П. М ТИХОМИРОВ

# РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

П. М. ТИХОМИРОВ

# РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

Книга содержит подробное изложение методики расчета трансформаторов для электрических печей; приведены примеры расчета. В книге даны необходимые для расчета сведения по конструкциям обмоток, сердечников и охладительных систем трансформаторов и тепловой расчет трансформатора. Дается также методика расчета реактора для электропечного трансформатора. Книга предназначена для инженеров и техников, работающих в области проектирования, монтажа и эксплуатации трансформаторов для электрических печей.

---

Автор *Павел Михайлович Тихомиров*

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Редактор *Ю. П. Устинова* Техн. редактор *Н. И. Борунов*

**Сдано в набор 14/II 1959 г. Подписано к печати 14/IV 1959 г.**
**Т-03997. Бумага 84×108[1]/[32]. 10,66 печ. л. Уч.-изд. л. 12,7.**
**Тираж 7 800 экз. Цена 7 р. 35 к. Заказ 97**

**Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.**

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Трансформаторы, служащие для питания электрических печей, имеют ряд характерных особенностей, вызванных особыми условиями режима работы электрической печи. Наиболее полно и ярко эти особенности проявляются у трансформаторов, питающих трехфазные дуговые сталеплавильные печи. Методика расчета таких трансформаторов существенно отличается от методики расчета нормальных силовых трансформаторов и в то же время учитывает практически все особенности расчета электропечных трансформаторов промышленной частоты (50 *гц*) другого назначения. Таким образом, книга по расчету трансформаторов для трехфазных дуговых электрических печей может дать достаточный материал и для расчета других электропечных трансформаторов.

Поскольку характерные особенности режима работы и характеристик электропечного трансформатора сказываются главным образом на выборе основных размеров и расчете обмоток и отводов, в книге подробно разработаны вопросы: выбора основных размеров электропечного трансформатора (гл. 1 и 2), конструкции и расчета обмоток и отводов (гл. 4), расчета характеристик короткого замыкания (гл. 5). Эти главы содержат все материалы для проведения расчета, а также необходимые обоснования и пояснения.

Методика расчета некоторых частей электропечного трансформатора не отличается от методики расчета нормального силового трансформатора. Эти разделы расчета — расчет изоляции (гл. 3), расчет магнитной системы (гл. 6) и тепловой расчет (гл. 7) — содержат минимально необходимые для проведения расчета сведения и пояснения. Читатели, желающие более углубленно познако-

миться с этими вопросами, отсылаются к имеющимся пособиям по расчету трансформаторов.

Электропечные трансформаторы часто выполняются в виде электропечного трансформаторного агрегата, размещенного в общем масляном баке и содержащего трансформатор, токоограничивающий реактор, переключатели и приводные механизмы для регулирования напряжения трансформатора. В книге поэтому дано краткое изложение расчета трехфазных токоограничивающих реакторов, входящих в состав агрегата (гл. 8), не претендующее на разработку методики расчета реакторов другого назначения. Расчет и конструкция переключателей, относящихся к области электрических аппаратов, в книге не затронуты.

Объем материалов, приведенных в книге, рассчитан на полное обеспечение расчета электропечных трансформаторов мощностью до 5 000—8 000 *ква* с естественным масляным охлаждением и является достаточным для выполнения электрического и магнитного расчетов более мощных трансформаторов. При изложении теории и методики расчета автор считал необходимым попутно сообщать также и те сведения по конструкции сердечника, обмоток и т. п., которые минимально необходимы при расчете.

При составлении пособия был использован опыт преподавания проектирования трансформаторов в Московском энергетическом институте, а также опыт Московского трансформаторного завода имени В. В. Куйбышева. Автор считает своим приятным долгом поблагодарить проф. Г. Н. Петрова и инж. В. В. Бритчука за ценные указания, данные ими после просмотра рукописи, а также инженеров Н. А. Толстикова и В. П. Красильникова за содействие в подборе материалов для книги.

Все замечания по книге автор просит направлять по адресу: Москва Ж-114, Шлюзовая наб., д. 10, Госэнергоиздат.

# СОДЕРЖАНИЕ

*ГЛАВА ПЕРВАЯ*

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

## 1-1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ТРАНСФОРМАТОРАМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫМ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Трансформаторы, предназначенные для питания электрических печей, во многом сходны с нормальными силовыми трансформаторами, однако особые условия работы электрической печи существенно сказываются на конструкции и режиме работы некоторых частей трансформатора. Эти условия и требования, вытекающие из особенностей конструкции, электрических данных и режима работы электрической печи, должны быть известны при проектировании электропечного трансформатора.

Электрические печи находят широкое применение в различных отраслях промышленности: черной и цветной металлургии, промышленности ферросплавов, машиностроении, химической промышленности при изготовлении стекла и керамики, пищевом и хлебопекарном производстве и др. Распространению электронагрева в промышленности способствуют возможность получения в электрических печах высоких температур (до 2 000° С и более), возможность создания и поддержания в печи любой искусственной атмосферы, удобство автоматического или ручного регулирования режима работы печи и пр.

Широкое применение электрических печей в промышленности, естественно, приводит к большому разнообразию типов, конструкций и мощностей этих печей [Л. 1]. Не касаясь классификации электрических печей по назначению, можно подразделить их по способу превращения электрической энергии в тепловую на две группы: элек-

трические печи сопротивления, в которых электрическая энергия превращается в тепло при прохождении тока через жидкие или твердые тела, и дуговые электрические печи, в которых превращение электрической энергии в тепло происходит в электрической дуге, горящей в газообразной среде. Существуют также печи смешанного типа, использующие оба эти принципа превращения электрической энергии в тепловую.

Наиболее характерными особенностями, присущими электрическим печам и отражающимися на конструкции и режиме работы питающего печь трансформатора, обладают дуговые печи. Электрические печи сопротивления имеют меньше таких особенностей, и трансформаторы, служащие для питания этих печей, меньше отличаются от нормальных силовых трансформаторов.

Для того чтобы выяснить, какие требования должны быть предъявлены к трансформатору, предназначенному для питания электрической печи, рассмотрим в качестве примера трехфазные дуговые сталеплавильные печи прямого действия, получившие широкое распространение в металлургии [Л. 1 и 2]. Специфические особенности этих печей, существенно влияющие на режим работы и конструкцию питающих трансформаторов, выражены более ярко, чем в печах других типов, и требования к электропечным трансформаторам, установленные в этом случае, могут быть с теми или иными ограничениями отнесены также и к трансформаторам, питающим электрические печи других типов.

Согласно ГОСТ 7206-54 дуговые электрические печи прямого действия для плавки стали предназначены для работы от трехфазной сети с частотой 50 *гц*. Номинальные емкости этих печей в тоннах составляют следующий ряд: 0,5; 1,5; 3; 5; 10; 20; 40; 80; 120 и 180 *т*.

В настоящее время выпущены и установлены такие печи емкостью до 45 *т*, и директивами XX съезда КПСС по шестому пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1956—1960 гг. предусмотрено освоение крупных электросталеплавильных печей емкостью до 180 *т* с электромагнитным перемешиванием металла.

Схема питания электрической дуговой печи (без защиты, автоматики и измерительных приборов) показана на рис. 1-1. Печь питается от отдельного трансформатора. Между сетью и обмоткой высшего напряжения трансформаторов мощностью до 5 000—8 000 *ква* включается реак-

тор. Более мощные трансформаторы включены в сеть без реактора. Провода, соединяющие обмотку низшего напряжения трансформатора с электродами печи, обычно представляют собой ряд медных шин большого сечения и называются **короткой сетью**.

Наличие дуги во внешней цепи обмотки низшего напряжения (НН) трансформатора оказывает существенное влияние на конструкцию этой обмотки и ее отводов. Для обеспечения нормального горения дуги обмотка НН должна иметь сравнительно низкое напряжение (порядка 100—400 *в*) даже у трансформаторов мощностью 15 000—25 000 *ква*. При этом вторичный ток трансформатора может достигать 25 000—35 000 *а* и более. Столь значительный ток может быть получен при разделении обмотки и отводов НН трансформатора на большое число параллельных ветвей, что возможно только при применении специальных конструкций обмоток и сложных шинных отводов.

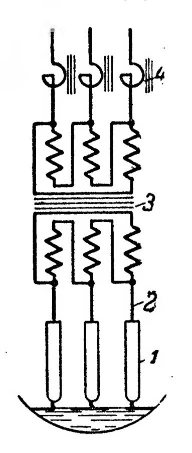


Рис. 1-1. Схема питания электрической дуговой печи.

*1* — электропечь; *2* — короткая сеть; *3* — трансформатор; *4* — реактор.

В электрических дуговых сталеплавильных печах прямого действия обычно производится выплавка стали из металлического лома — скрапа. Скрап загружается в ванну печи и затем нагревается электрическими дугами, горящими между тремя электродами, опускаемыми в печь сверху, и поверхностью металла. Процесс плавки стали может быть подразделен на три последовательных периода: расплавление скрапа, окисление и рафинировка металла, т. е. доведение его состава до требуемого анализом готовой стали.

С точки зрения режима работы трансформатора наиболее тяжелым является первый период, составляющий по времени 50—60% общей длительности процесса плавки. В этот период печь потребляет наибольшую мощность, необходимую для прогрева всей массы холодного металла и на покрытие скрытой теплоты его плавления. Горение дуги в этот период нестабильно. Длина дуги невелика; она горит между концом электрода и холодным металлом, и небольшие изменения во взаимном расположении электрода и кусков скрапа — обвал или сдвиг подплавленных кусков скрапа — могут оборвать дугу или

вызвать короткое замыкание. В первую очередь расплавляется скрап, находящийся вблизи электрода, и под тремя электродами печи образуются три колодца, в которые электроды постепенно опускаются автоматическим устройством, регулирующим горение дуг. Обвалы стенок этих колодцев также приводят к коротким замыканиям. Таким образом, работа трансформатора в этот первый период плавки протекает в условиях потребления печью наибольшей мощности при частых толчках нагрузки, коротких замыканиях и обрывах тока в обмотке низшего напряжения (НН).

Для защиты обмоток трансформатора от теплового и механического воздействия при толчках тока и коротких замыканиях ток короткого замыкания трансформатора должен быть ограничен. Трансформатор должен выполняться с повышенным значением напряжения короткого замыкания или снабжаться токоограничивающим реактором. Обычно считают, что ток короткого замыкания не должен превышать номинальный ток более чем в 2,5—4 раза. Поскольку частые короткие замыкания, являющиеся характерной особенностью режима дуговой сталеплавильной печи, происходит на электродах печи, ток короткого замыкания всей установки ограничивается общим сопротивлением реактора, трансформатора и короткой сети. С ростом мощности печи и трансформатора растет относительное сопротивление короткой сети, что позволяет для трансформаторов мощностью более 5 000—8 000 *ква* отказаться от применения реакторов и искусственного повышения напряжения короткого замыкания.

Второй и третий периоды плавки протекают при потреблении меньшей мощности, так как расплавление металла к началу второго периода заканчивается. Дуга между электродом и жидким металлом горит более стабильно, обрывы тока практически исключаются, а сравнительно редкие короткие замыкания происходят лишь при бурном кипении металла. Трансформатор при этом работает более спокойно, мощность, отдаваемая им, значительно уменьшается, для чего должна быть предусмотрена возможность регулирования напряжения.

Обычно уменьшение мощности достигается за счет уменьшения вторичного напряжения трансформатора, при сохранении величины тока, установленного в первый период плавки, путем пересоединения первичной обмотки трансформатора (обмотки ВН) с треугольника на звезду

с перерывом питания нагрузки и отключением трансформатора от сети. После перехода ко второму периоду плавки реактор обычно отключается.

В целях улучшения управления процессом плавки часто требуется регулирование напряжения во всех трех периодах плавки. Это регулирование обычно осуществляется путем изменения числа включенных витков первичной обмотки при помощи переключателя ступеней с перерывом нагрузки для трансформаторов мощностью менее 15 000 *ква* и без перерыва нагрузки для более мощных трансформаторов.

Электрические печи и питающие их трансформаторы устанавливаются в закрытых помещениях (внутренняя установка). При этом стараются уменьшить расход меди на так называемую короткую сеть, т. е. на шины, соединяющие обмотку НН трансформатора с печью, для чего устанавливают трансформатор по возможности ближе к печи. Такая установка ухудшает условия теплоотдачи трансформатора, так как среднегодовая температура воздуха в помещении значительно выше, чем на открытой установке, а условия охлаждения — тяжелее. Это обстоятельство приходится учитывать при тепловом расчете трансформатора. Так, например, у трансформаторов, предназначенных для питания сталеплавильных электрических печей, превышение средней температуры обмоток над температурой окружающего воздуха допускается не более 60° С и масла в верхней части бака — не более 50° С, в то время как для нормальных силовых трансформаторов эти превышения допускаются соответственно до 70 и 60° С.

Из рассмотрения режима работы сталеплавильной дуговой электрической печи следует, что трансформатор, предназначенный для питания этой печи, должен обладать следующими особенностями, отличающими его от нормального силового трансформатора:

а) Высокий номинальный ток на стороне НН, доходящий до тысяч и десятков тысяч ампер.

б) Повышенное напряжение короткого замыкания, такое, чтобы внутреннее сопротивление самого трансформатора вместе с сопротивлением короткой сети и реактора ограничивало ток короткого замыкания 2,5—4-кратной величиной по отношению к номинальному.

в) Повышенная механическая прочность крепления обмоток и отводов, рассчитанная на частые толчки тока и короткие замыкания.

г) Возможность регулирования напряжения в широких пределах.

д) Пониженные допустимые превышения температуры обмоток, сердечника и масла над температурой воздуха, окружающего трансформатор.

Эти особенности, свойственные трансформатору, предназначенному для питания дуговой трехфазной сталеплавильной печи, являются характерными и в той или иной степени относятся также и к трансформаторам, служащим для питания электрических печей других типов. При этом индукционные печи и печи сопротивления имеют значительно более спокойный график нагрузки. Во всех случаях особые требования, предъявляемые к электропечному трансформатору, или непосредственно записываются в технических условиях на трансформатор, или вытекают из других требований этих условий.

## 1-2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КОНСТРУКЦИЙ ЧАСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРА

Обычно электропечной трансформатор, реактор и переключатели обмотки ВН для переключения с треугольника на звезду и регулирования напряжения по ступеням выполняются в виде комплектного трансформаторного агрегата, заключенного в общий бак, заполненный трансформаторным маслом. На стенке этого бака снаружи размещается приводной механизм, служащий для ручного или автоматического дистанционного управления переключателями напряжения.

Примерная схема трансформаторного агрегата с реактором и переключателями напряжения показана на рис. 1-2. Начала и концы обмоток НН выведены на крышку бака для соединения в треугольник. Обмотки ВН имеют отпайку ($X_2$; $У_2$; $Z_2$) для регулирования напряжения. Все начала и концы обмоток ВН выведены к переключателям, позволяющим производить соединение этих обмоток в треугольник (соединены зажимы *2* и *3* или *3* и *4*) или в звезду (соединены зажимы *4* и *5* или *5* и *2*) соответственно на отпайках $X_2$; $У_2$; $Z_2$ или на концах $X_4$; $У_4$; $Z_4$. Таким образом, получаются четыре различные ступени напряжения на обмотке НН.

Обмотки реактора включены между линейными зажимами агрегата *A*, *B*, *C* и линейными зажимами обмотки ВН $A_{10}$; $B_{10}$; $C_{10}$. Выведенные к переключателям отпайки и концы обмоток реактора $A_6$; $B_6$; $C_6$...$A_9$;

$B_9$; $C_9$ позволяют использовать индуктивное сопротивление реактора полностью или частично, или совсем отключить реактор.

Левые (зажимы *2—5*), так же как и правые (зажимы *6—10*), переключатели всех трех фаз агрегата связаны механически общими осями, выведенными к приводному механизму с дистанционным управлением. Все переключения с одной ступени на другую производятся только после отключения трансформатора от питающей сети.

На рис. 1-3 показана выемная часть современного электропечного трансформаторного агрегата ЭТМПК-2700/10,

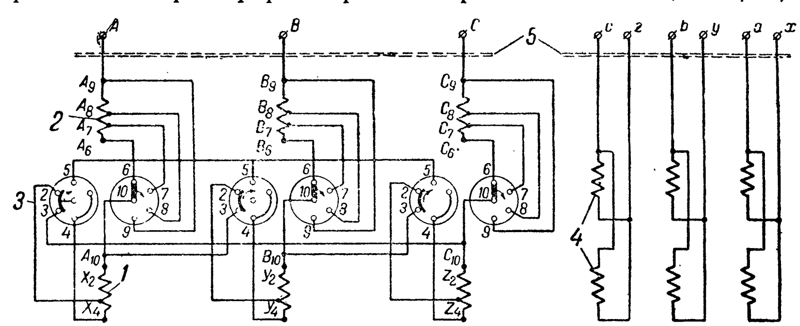



Рис. 1-2. Схема электропечного трансформаторного агрегата.
*1* — обмотка ВН трансформатора; *2* — реактор; *3* — переключатели; *4* — обмотка НН трансформатора; *5* — крышка бака.

предназначенного для питания трехфазной дуговой сталеплавильной печи емкостью 3 *т*. Агрегат состоит из трансформатора с номинальной мощностью 1 800 *ква*, токоограничивающего реактора, расположенного между верхним ярмом трансформатора и крышкой бака, и переключателей, также расположенных над верхним ярмом трансформатора. На рисунке видны шины отводов от обмоток низшего напряжения трансформатора.

На рис. 1-4 показан вид агрегата с другой стороны — стороны расположения отводов от обмоток высшего напряжения.

Конструктивной и механической основой трансформатора является его сердечник, собираемый из листов специальной электротехнической тонколистовой стали. Механическое крепление сердечника осуществляется специальными конструкциями: прессующими (ярмовыми) балками корытного профиля (швеллерами) или сварными стальными балками, а также различными стяжными болтами или шпильками и другими крепежными деталями. Собранный

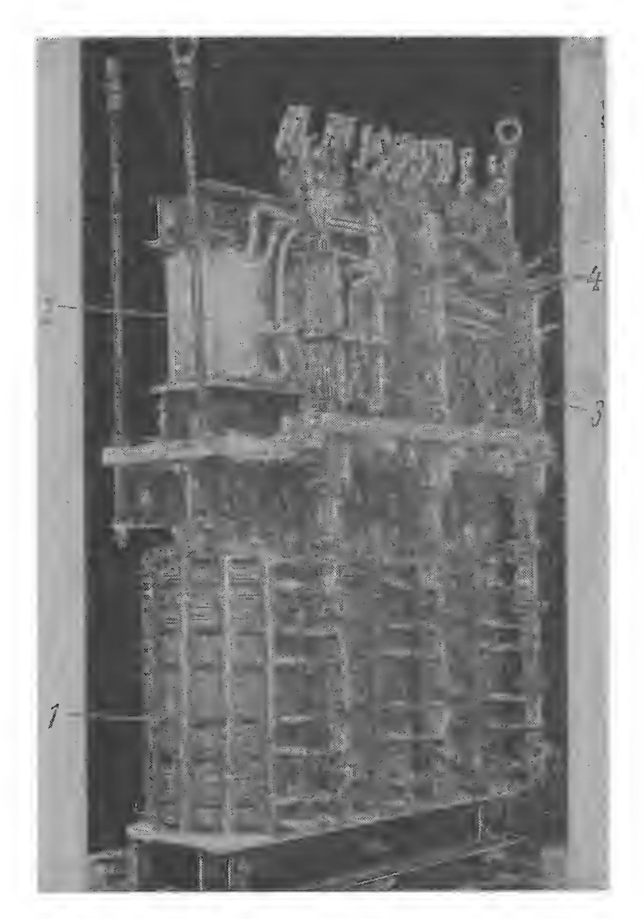



Рис. 1-3. Выемная часть электропечного трансформаторного агрегата.

*1* — трансформатор мощностью 1 800 *ква*; *2* — реактор; *3* — место установки переключателей; *4* — отводы от обмоток низшего напряжения.

сердечник со всеми крепежными конструкциями и деталями называется остовом трансформатора. Остов трансформатора с обмотками и отводами от обмоток, т. е. проводниками, выведенными от обмоток к крышке трансформатора, в масляных трансформаторах называется выемной частью.

В сердечниках различают: стержни — части сердечника, на которых располагаются обмотки, и ярма — части,

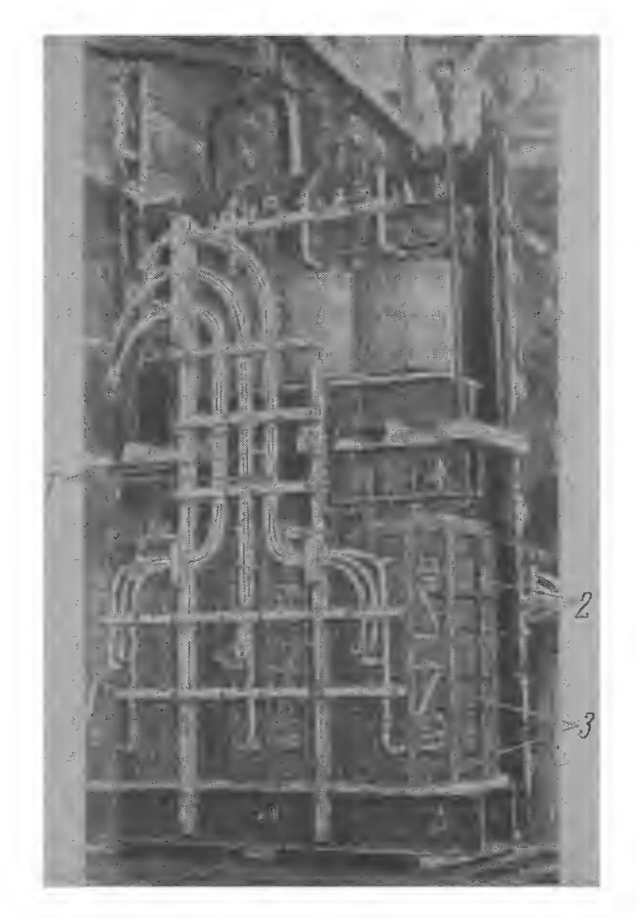



Рис. 1-4. Выемная часть электропечного трансформаторного агрегата.

*1* — отводы от обмоток высшего напряжения; *2* — обмотка высшего напряжения; *3* — обмотка низшего напряжения.

не несущие обмоток и служащие для замыкания магнитной цепи (рис. 1-5). Ярма обычно сжимаются между прессующими балками, а стержни запрессовываются шпильками и специальными накладками или же вовсе не имеют специальных стяжных конструкций и запрессовываются путем забивания деревянных планок между стержнем и обмоткой. Пространство, ограниченное двумя соседними стержнями и двумя ярмами, называется окном сердечника или трансформатора.

В зависимости от взаимного расположения стержней, ярем и обмоток сердечники разделяются на стержневые и броневые. В стержневых сердечниках ярма прилегают к торцовым поверхностям обмоток, не охватывая их боковых поверхностей (рис. 1-5). Стержни таких трансформаторов располагаются вертикально.

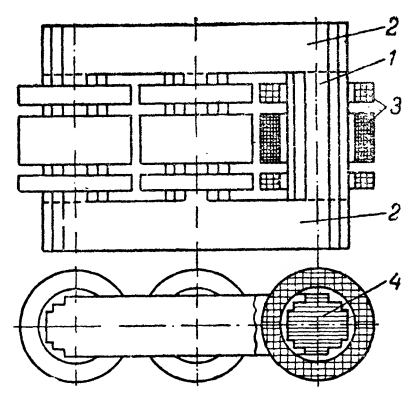



Рис. 1-5. Сердечник трехфазного стержневого трансформатора с обмотками.

*1* — стержень; *2* — ярмо; *3* — обмотки; *4* — поперечное сечение стержня.

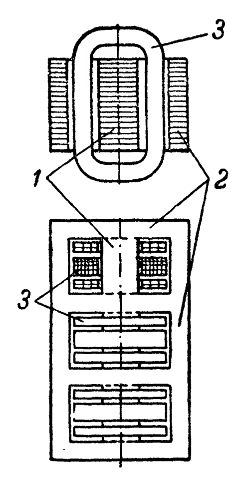



Рис. 1-6. Сердечник трехфазного броневого трансформатора с обмотками.

*1* — стержень; *2* — ярмо; *3* — обмотки.

Поперечное сечение стержней в стержневых трансформаторах чаще всего выполняется в виде ступенчатой фигуры, вписанной в окружность и рассчитанной на применение обмоток в виде круговых цилиндров или дисков. Этот тип сердечников получил наибольшее распространение и в настоящее время применяется для большинства нормальных силовых и специальных трансформаторов, в том числе и электропечных.

В броневых сердечниках ярма охватывают не только торцовые, но и боковые поверхности обмоток, как бы закрывая обмотки броней, отчего этот тип сердечников и получил название броневого (рис. 1-6). Для броневых сердечников наиболее характерна прямоугольная форма поперечного сечения стержней, рассчитанная на применение обмоток также прямоугольной формы с закругленными углами. Этот тип сердечников применяется некоторыми иностранными фирмами для электропечных трансформа-

торов. Стержни и ярма в этом случае располагаются горизонтально, а диски катушек обмоток — вертикально. Благодаря такому расположению уменьшается расстояние от обмоток до крышки бака трансформатора, а следовательно, уменьшаются длина и вес отводов, что для электропечных трансформаторов, имеющих тяжелые отводы, является весьма существенным. Вместе с этим длина отводов от различных частей обмотки оказывается одинаковой, что благоприятно сказывается на распределении тока между параллельными ветвями обмотки.

Обладая указанными достоинствами, броневые сердечники не лишены, однако, и существенных недостатков. Основными недостатками этих сердечников являются сложность конструкции стяжки и крепления остова и обмоток, а также значительно бóльшая по сравнению со стержневыми сердечниками трудоемкость сборки трансформатора. Обмотки прямоугольной формы, применяемые на броневых сердечниках, обладают меньшей механической прочностью, чем круглые обмотки стержневых трансформаторов. Поэтому отечественное трансформаторостроение решает проблему отвода значительных токов в электропечных трансформаторах, применяя стержневые сердечники как менее трудоемкие и более простые в конструктивном отношении.

Обмотки трансформатора различают по назначению, способу взаимного расположения и форме. Трансформаторы, служащие для питания электрических печей, являются, как правило, двухобмоточными и имеют две электрически не связанные обмотки. Обмотка высшего напряжения (ВН) присоединяется к питающей сети, обмотка низшего напряжения (НН) через короткую сеть — к электродам или вводам электрической печи.

Взаимное расположение обмоток ВН и НН на стержне сердечника может быть концентрическим (рис. 1-7,*а* или *б*) или осевым (рис. 1-7,*в*). Обмотки, расположенные как на рис. 1-7,*в*, называются чередующимися или дисковыми. В целях уменьшения механических сил, возникающих между обмотками при коротком замыкании, при концентрическом расположении стараются выдержать равными осевые размеры обмоток ВН и НН, а в чередующейся обмотке — их внутренние и внешние диаметры.

Наиболее компактным и экономным является концентрическое расположение обмоток по рис. 1-7,*а*. В этом случае внутренние изоляционные каналы занимают мини-

мальную площадь в осевом сечении обмотки, а изоляция обмотки ВН и вывод отпаек от нее получаются наиболее простыми. Такое расположение обмоток применяется обычно для нормальных силовых трансформаторов.

Характерными особенностями электропечных трансформаторов являются повышенное значение напряжения короткого замыкания и большой ток в обмотке НН, требующий подразделения этой обмотки на ряд паралельных ветвей. Концентрическая обмотка по рис. 1,7,*а* не отвечает

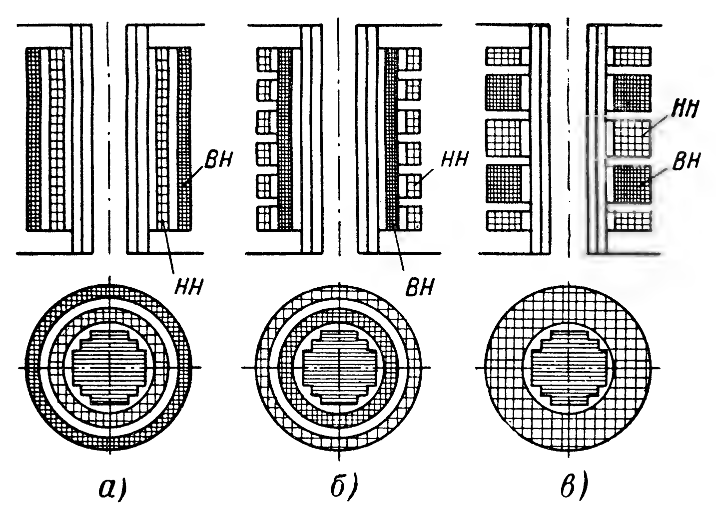



Рис. 1-7. Концентрические (*а* и *б*) и чередующиеся (*в*) обмотки.

этим двум требованиям и для электропечных трансформаторов обычно не применяется. В отдельных случаях применяется концентрическая обмотка по рис. 1-7,*б*, допускающая удобную разбивку обмотки НН на ряд параллельных ветвей, но имеющая ограниченное напряжение короткого замыкания. Наибольшие удобства для этих трансформаторов представляет чередующаяся обмотка по рис. 1-7,*в*. Такое расположение позволяет получить любое число параллельных ветвей в обмотке НН при удобном выполнении всех соединений снаружи обмотки, а также допускает широкое варьирование напряжения короткого замыкания за счет изменения числа групп обмотки. Поэтому большинство электропечных трансформаторов в настоящее время строится с чередующейся обмоткой, хотя

она и является менее компактной и более дорогой, чем концентрическая.

Подразделение чередующейся обмотки на группы выполняется обычно так, чтобы н. с. обмоток ВН и НН в каждой группе были равны и катушки одной из обмоток группы (обычно ВН) с двух сторон охватывались симметрично расположенными катушками другой обмотки (обычно НН) так, как это показано на рис. 1-8,*а*. Симметричная обмотка всегда может быть разделена на одинаковые подгруппы, число которых равно удвоенному

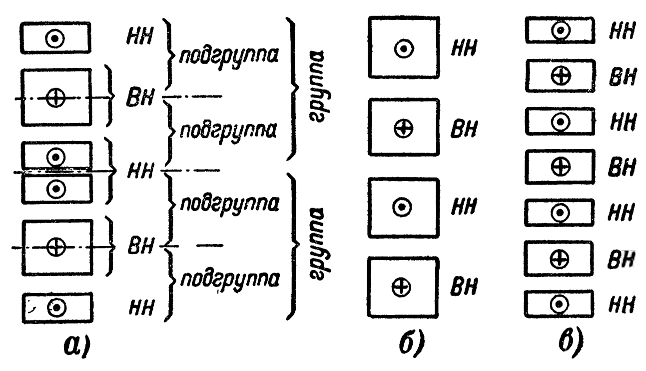



Рис. 1-8. Чередующаяся обмотка.

*а* — симметричная из двух магнитно-уравновешенных групп; *б* — несимметричная из двух магнитно-уравновешенных групп; *в* — несимметричная, не разделяющаяся на магнитно-уравновешенные группы.

числу групп. Обмотки одного наименования (ВН или НН) всех подгрупп могут соединяться параллельно или последовательно. Если требование равенства н. с. двух обмоток группы или симметрии их взаимного расположения не выполняется, то обмотка получается несимметричной (рис. 1-8,*б* и *в*). В практике избегают применять несимметричную обмотку, так как она не всегда допускает параллельное соединение одинаковых обмоток разных групп.

Выемная часть электропечного трансформатора обычно погружается в бак с трансформаторным маслом. Концы от обмоток при этом должны быть выведены на крышку бака, где они присоединяются к короткой сети печи. Проводники, подходящие от обмоток к крышке, называются отводами трансформатора, а проводники, проходящие сквозь крышку вместе с изоляцией от крышки, называются вводами. Отводы и вводы от обмотки ВН электропечного трансформатора в конструктивном отношении не

отличаются от этих частей нормального силового трансформатора.

Отводы и вводы от обмотки НН электропечного трансформатора, предназначенные для отведения токов, достигающих иногда десятков и сотен тысяч ампер, представляют собой сложную систему медных шин большого сечения и большого веса. В отдельных случаях применяют вводы, состоящие из медных труб, охлаждаемых водой, циркулирующей внутри этих труб.

При расчете и конструировании отводов и вводов НН электропечного трансформатора приходится учитывать не только их большой вес, но также и ряд явлений, связанных с магнитным потоком рассеяния, возникающим вокруг отводов.

Под действием этого потока возникают добавочные потери в отводах и ферромагнитных деталях конструкции трансформатора (стенках бака, прессующих балках остова и т. п.), падение напряжения в шинах отводов, а также значительные механические силы взаимодействия между шинами (при коротком замыкании трансформатора). Задача рационального конструирования отводов заключается в таком их расположении, при котором отрицательные явления, связанные с потоком рассеяния, были бы сведены к минимуму. Практикой выработан ряд рекомендаций, при правильном применении которых достигается рациональное расположение отводов и вводов трансформатора. Задача расчета при этом сводится к поверочному расчету весов, потерь и индуктивностей отводов.

Во время работы трансформатора в его обмотках и сердечнике возникают электрические и магнитные потери энергии, выделяющиеся в виде тепла. При режиме длительной нагрузки, не ограниченной по времени, все выделяющееся тепло должно полностью отводиться в окружающую трансформатор среду. В большинстве современных силовых трансформаторов отвод тепла от обмоток и сердечника осуществляется через посредство специальной масляной ванны — бака, залитого трансформаторным маслом, в который погружается трансформатор.

Масло, омывающее обмотки и сердечник трансформатора, нагреваясь у их поверхностей, отводит путем конвекции все выделяющееся в них тепло и передает его стенкам бака. Внешняя поверхность стенок бака, омываемая воздухом, отдает тепло путем конвекции и излучения. Такая система отвода тепла позволяет применить высокие элек-

тромагнитные нагрузки активных материалов — меди обмоток и стали сердечника — и получить трансформатор с малым весом этих материалов.

Трансформаторное масло одновременно является хорошим изоляционным материалом, позволяющим получить высокую электрическую прочность трансформатора при малых изоляционных промежутках и компактной конструкции обмоток и сердечника. Вследствие этого масляный, т. е. залитый маслом, трансформатор оказывается более компактным, легким и дешевым, чем так называемый сухой трансформатор, не погруженный в масло и рассчитанный на естественное воздушное охлаждение.

Для обеспечения нормальной теплоотдачи в окружающий воздух внешняя поверхность масляного бака должна быть достаточно велика, а с ростом мощности и потерь трансформатора она должна увеличиваться быстрее, чем растет естественная поверхность, пропорциональная квадрату линейных размеров. При мощности трансформатора более 20—30 *ква* необходимая величина поверхности бака может быть получена лишь при искусственном ее разветвлении. Хорошим решением этого вопроса является применение трубчатого бака. Стальные трубы диаметром 3—6 *см* располагаются вертикально, параллельно стенке бака. Концы труб изгибаются и ввариваются в верхнюю и нижнюю части стенки. В случае необходимости вокруг бака располагают два-три (не более четырех) ряда труб. Горячее масло поступает из бака в верхнее отверстие трубы, движется по трубе вниз, отдавая тепло через стенки трубы в окружающий воздух, и охлажденным возвращается в нижнюю часть бака. Этот тип бака обеспечивает хорошую теплоотдачу для трансформаторов мощностью до 2 000 *ква,* обладает высокой механической прочностью, прост в производстве.

Для трансформаторов мощностью более 2 000 *ква* более целесообразным является применение гладкого бака с подвешенными к нему охладителями-радиаторами, например по типу бака на рис. 1-9. Масло, поступающее из верхней части бака в верхний патрубок радиатора, охлаждается при движении вниз внутри труб радиатора и через его нижний патрубок вновь попадает в нижнюю часть бака трансформатора. Бак такого типа при естественном охлаждении может обеспечить нормальную теплоотдачу для трансформатора мощностью до 10 000—15 000 *ква.* При больших мощностях периметр гладкого

бака оказывается недостаточным для размещения необходимого числа радиаторов. В этом случае выходом из положения является переход от естественного к форсиро-



Рис. 1-9. Трубчатый охладитель-радиатор, подвешиваемый к главному баку (фото).

ванному охлаждению, которое может осуществляться путем ускорения движения масла или воздуха.

На рис. 1-10 показано часто применяемое форсированное охлаждение бака с радиаторами при помощи обдувания небольшими вентиляторами, установленными на каждом радиаторе. При этом способе можно увеличить тепло-

отдачу бака на 50—60% по сравнению с теплоотдачей при естественном охлаждении.

Для того чтобы обеспечить заполнение маслом бака трансформатора до самой крышки при возможных в эксплуатации колебаниях температуры и объема масла, крышка крепится к баку на маслоплотном уплотнении, а над крышкой устанавливается расширитель — стальной бачок, сообщающийся с основным баком трубопроводом. Объем расширителя (обычно 8—10% объема масла в баке) выбирается таким, чтобы при любых колебаниях температуры и объема масла верхний его уровень оставался в пределах расширителя. Установка расширителя, иногда называемого консерватором, способствует также сохранению (консервации) масла, так как позволяет свести к минимуму поверхность соприкосновения (зеркало) масла с воздухом.

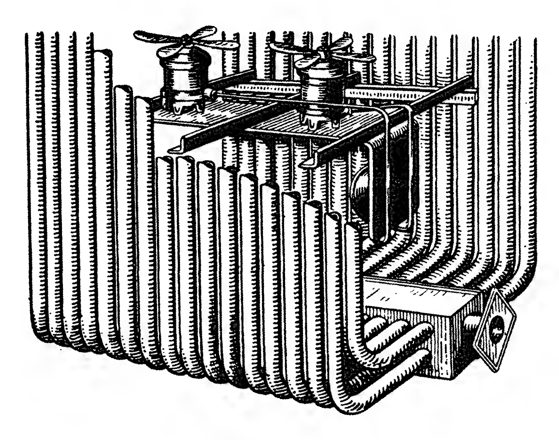


Рис. 1-10. Установка вентиляторов для обдувания радиатора.

Естественное и форсированное воздушное охлаждение бака трансформатора приводит к значительному увеличению габаритов трансформатора и необходимости обеспечения свободного доступа и отвода больших масс воздуха. Для электропечных трансформаторов, устанавливаемых внутри помещений, зачастую вдали от внешних стен цеха, это приводит к большим затруднениям. Поэтому при мощности электропечного трансформатора 2 800—5 000 *ква* и более применяют охлаждающую систему с усиленной циркуляцией масла (рис. 1-11). Масло из бака

трансформатора откачивается насосом, прогоняется через водяной или воздушный теплообменник и охлажденное вновь возвращается в бак трансформатора.

Применяя эту систему, следует считаться с тем, что форсированное охлаждение во всех случаях требует по-

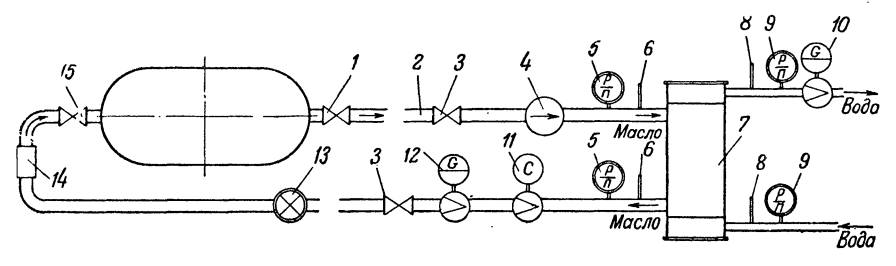



Рис. 1-11. Установка для охлаждения трансформаторов с принудительной циркуляцией масла.

1 — задвижка на выходном патрубке бака трансформатора; 2 — маслопровод; 3 — задвижка в маслопроводе; 4 — насос для масла с электродвигателем; 5 — манометры для масла на входе и выходе из маслоохладителя; 6 — термометры для масла; 7 — трубчатый маслоохладитель; 8 — термометры для воды; 9 — манометр для воды; 10 — расходомер воды; 11 — сигнальный аппарат для масла; 12 — расходомер масла; 13 — воздухоотделитель; 14 — сетчатый фильтр; 15 — задвижка на входном патрубке бака.

стоянной дополнительной затраты энергии на перекачку масла и подачу воздуха или воды, чем снижается общий к. п. д. трансформатора. Водяное охлаждение, кроме того, требует значительного расхода воды.

## 1-3. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Общей задачей проектировщика при расчете любого трансформатора является получение трансформатора заданной мощности с заданными напряжениями обмоток, обладающего заданными характеристиками, достаточно прочного в электрическом и механическом отношениях, нагревостойкого, наиболее простого и дешевого в производстве.

Проектируемый трансформатор в большинстве случаев должен соответствовать требованиям стандарта или специальных технических условий и, следовательно, обладать совершенно определенными техническими характеристиками. Из практики проектирования известно, что эта задача может быть решена многозначно, так как при одних и тех же исходных данных (мощность, напряжения

обмоток и характеристики), задаваясь различными соотношениями между основными размерами трансформатора, можно получить ряд различных вариантов его исполнения. Эти варианты могут различаться как основными размерами трансформатора, так и величинами электромагнитных нагрузок (плотности тока в обмотках и магнитной индукции в сердечнике), весами и стоимостью активных материалов (меди обмоток и стали сердечника), механической прочностью и нагревостойкостью обмоток.

Выбор оптимального варианта при расчете отдельных частей трансформатора — магнитной системы, обмоток, охладительной системы и т. д.— производится обычно или в соответствии с рекомендациями, выработанными практикой, или путем сравнения различных рассчитанных вариантов.

Трансформаторы, предназначенные для питания электрических печей, выполняются обычно по специальным техническим условиям: типовым, т. е. установленным для данной серии трансформаторов, или индивидуальным, т. е. относящимся только к данному трансформатору. Индивидуальные типовые технические условия составляются по согласованию между заказчиком трансформатора и заводом-изготовителем.

Для некоторых электропечных трансформаторов разработаны государственные стандарты. Так, например, на трехфазные трансформаторы для дуговых сталеплавильных печей утвержден стандарт ГОСТ 7207-54, регламентирующий ряд номинальных мощностей и напряжений и некоторые другие данные этих трансформаторов. Мощности и напряжения, установленные для этих трансформаторов, в сочетании с рядом номинальных емкостей дуговых сталеплавильных печей приведены в табл. 1-1.

Номинальные мощности, приведенные в таблице, отнесены к высшей ступени вторичного напряжения. На остальных ступенях номинальная мощность трансформаторов понижается пропорционально изменению вторичного напряжения. Предельные вторичные напряжения могут отклоняться от указанных в таблице на $\pm 5\%$.

Обмотки трансформаторов соединяются по схеме $\Delta$-Y/$\Delta$-12-11. Пересоединение первичной обмотки с $\Delta$ на Y осуществляется при отключении трансформатора от первичной сети. Переключение других ступеней вторичного напряжения на трансформаторах 400—9 000 *ква* может осуществляться при отключении их от первичной сети,

Таблица 1-1

**Номинальные мощности и напряжения электропечных трансформаторов**

| Емкость печи | *т* | 0,5 | 1,5 | 3 | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Номинальная мощность трансформатора | *ква* | 400 | 1 000 | 1 800 | 2 800 | 5 000 | 9 000 | 15 000 | 25 000 |
| Номинальное первичное напряжение | *в* | 6 000 и 10 000 | | | | | | 35 000 | |
| Пределы номинального вторичного напряжения | *в* | 212—110 | 224—116 | 245—121 | 260—116 | 280—116 | 320—116 | 360—127 | 420—133 |
| Число ступеней вторичного напряжения | — | 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 | Не менее 12 | |

а на трансформаторах 15 000 *ква* и выше должно производиться под нагрузкой.

Напряжение короткого замыкания в этой серии трансформаторов установлено в пределах 5—10%. Ряд других требований, обычно предъявляемых к нормальным и электропечным трансформаторам, в стандарт не включен. Эти требования включаются в типовые и индивидуальные технические условия.

В специальные технические условия на трансформаторы для дуговых сталеплавильных печей включены, например, следующие дополнительные условия. Номинальный режим работы трансформатора (в процессе одной плавки) состоит из числа часов работы трансформатора при соединении первичной обмотки в треугольник $T_{\Delta}$ и числа часов работы при соединении первичной обмотки в звезду $T_{\lambda}$. Значения $T_{\Delta}$ и $T_{\lambda}$ для трансформаторов различных мощностей приведены в табл. 1-2.

Таблица 1-2

| Номинальная мощность трансформатора | 400—1 800 *ква* | 2 800—5 000 *ква* | 9 000—15 000 *ква* | 25 000 *ква* |
|---|---|---|---|---|
| $T_{\Delta}$, *ч* | 1,5 | 1,75 | 2,0 | 2,25 |
| $T_{\lambda}$, *ч* | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 |

Суммарное значение напряжения короткого замыкания трансформатора, реактора и короткой сети должно быть выдержано таким, чтобы ток короткого замыкания всей установки превосходил номинальный ток не более чем в 2,5—4 раза. Это требование удовлетворяется при

Таблица 1-3

**Ориентировочные значения напряжений короткого замыкания: трансформатора $u_к$, реактора $u_{кр}$ и короткой сети $u_{к.с}$**

| Мощность $S$ (*ква*) | 400 | 1 000 | 1 800 | 2 800 | 5 000 | 9 000 | 15 000 | 25 000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Трансформатор $u_к$ (%) | 7—10 | 7—10 | 7—10 | 6—8 | 8—10 | 8—10 | 8—10 | 8—10 |
| Короткая сеть $u_{к.с}$ (%) | 5 | 7 | 10 | 12 | 16 | 25 | 30 | 32,5 |
| Реактор $u_{кр}$ (%) | 25—28 | 25 | 18 | 15 | 10 | 5 | — | — |

подборе напряжений короткого замыкания трансформатора $u_к$, реактора $u_{к.р}$ и короткой сети — $u_{к.с}$ в пределах, данных в табл. 1-3.

Для напряжения короткого замыкания установлен допуск ± 10%. Трансформаторы с регулированием напряжения с отключением нагрузки должны иметь дистанционное управление переключателями обмотки ВН, вынесенное на щит управления. Условиями предусмотрены также внутренняя установка трансформатора, т. е. в закрытом помещении, и некоторые другие требования.

*ГЛАВА ВТОРАЯ*

# ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ СТЕРЖНЯ И ОБМОТОК

## 2-1. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТ И СХЕМА РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРНОГО АГРЕГАТА

В задании на проект электропечного трансформаторного агрегата должны быть указаны следующие данные:

1) полная мощность трансформатора — $S$, *ква*;

2) число фаз — $m$;

3) частота — $f$ *гц*;

4) номинальные междуфазные (линейные) напряжения первичной и вторичной обмоток $U_1$ и $U_2$ *в*;

5) схема и группа соединения обмоток;

6) способ охлаждения трансформатора;

7) характер нагрузки — длительная или кратковременная; для длительной переменной или кратковременной нагрузки должны быть указаны величина и продолжительность отдельных этапов нагрузки, а также продолжительность интервалов между нагрузками;

8) характер установки — внутренняя или наружная;

кроме этих данных, в задании могут быть указаны основные характеристики трансформатора:

9) напряжение короткого замыкания — $u_к$, %;

10) потери короткого замыкания — $P_к$, *вт*;

11) потери холостого хода — $P_х$, *вт*;

12) ток холостого хода — $i_0$, %.

Характеристики могут быть заданы непосредственно или в виде ссылки на соответствующий ГОСТ или технические условия.

Должно быть также указано, необходим ли для трансформатора реактор, и дана индуктивность реактора или падение напряжения на нем при номинальном токе, выраженное в процентах напряжения сети $u_{кр}$.

Трансформатор должен быть спроектирован в соответствии с заданием так, чтобы вместе с этим он отвечал требованиям эксплуатации в части экономичности работы, электрической и механической прочности и нагревостойкости, а также был простым и дешевым в производстве. Экономичость работы трансформатора в эксплуатации зависит от правильного выбора его характеристик — потерь короткого замыкания и холостого хода. Этот вопрос обычно решается при разработке новых стандартов или проектировании серий трансформаторов различных назначений. При индивидуальном расчете трансформатора характеристики обычно задаются по ГОСТ или специальным техническим условиям.

Соблюдение определенных характеристик достигается подбором соответствующих удельных нагрузок активных материалов — индукции в сердечнике и плотности тока в обмотках, а также рациональным выбором основных размеров трансформатора. Вопрос построения трансформатора, обладающего наибольшими прочностью и долговечностью, а также наиболее простого и дешевого в производстве, решается правильным определением тех воздействий, которым он подвергается в эксплуатации, рациональным выбором его конструкции, правильным выбором размеров и материала отдельных его частей и конструктивных деталей. Ряд рекомендаций по этим вопросам дается в главах, посвященных расчету сердечника, обмоток и других частей трансформатора.

Расчет трансформатора тесно связан со вторым этапом проектирования — конструированием. Уже на самых первых стадиях расчета необходимо произвести выбор основной конструктивной схемы трансформатора, а также в ходе расчета выбирать конструкции его отдельных частей — сердечника, обмоток, изоляционных деталей, отводов и т. д. Поэтому, приступая к работе, расчетчик должен иметь ясное представление о современных конструкциях частей трансформатора, практически возможных пределах их применения, достоинствах и недостатках.

Для облегчения работы расчетчика в тексте настоящего пособия приводятся сведения по конструкции частей трансформатора — сердечника, обмоток, бака и т. д. в объеме,

Схема расчета электропечного трансформатора

| | |
|---|---|
| 1. Определение основных электрических величин (гл. 2) | а) Определение линейных и фазных токов и напряжений обмоток НН и ВН<br>б) Определение испытательных напряжений обмоток<br>в) Выбор способа взаимного расположения обмоток, схемы соединения частей обмоток НН и ВН и схемы отводов |
| 2. Определение основных размеров трансформатора (гл. 2) | а) Выбор конструкции сердечника<br>б) Выбор марки и толщины листов стали и типа междулистовой изоляции. Выбор индукции<br>в) Определение диаметра стержня и высоты обмотки. Предварительный расчет сердечника |
| 3. Расчет обмоток НН и ВН (гл. 3) | а) Определение размеров и выбор конструкции изоляции основных промежутков главной изоляции обмоток |
| (гл. 4) | б) Выбор типа обмоток НН и ВН<br>в) Расчет обмотки НН<br>г) Расчет обмотки ВН |
| 4. Определение характеристик короткого замыкания (гл. 5) | а) Определение потерь короткого замыкания<br>б) Определение напряжения короткого замыкания<br>в) Определение механических сил в обмотках |
| 5. Окончательный расчет магнитной системы. Определение характеристик холостого хода и к. п. д. трансформатора (гл. 6) | а) Определение размеров пакетов и активных сечений стержня и ярма<br>б) Определение весов стержней, ярем и стали<br>в) Определение потерь холостого хода и к. п. д.<br>г) Определение тока холостого хода |
| 6. Расчет реактора (гл. 8) | Расчет магнитной системы, обмоток и характеристик реактора |
| 7. Тепловой расчет и расчет охладительной системы (гл. 7) | а) Поверочный тепловой расчет обмоток<br>б) Расчет охладительной системы (бака, охладителей)<br>в) Окончательное определение превышений температуры обмоток и масла над температурой окружающего воздуха<br>г) Определение веса масла |

минимально необходимом для расчета, и даются рекомендации по выбору этих конструкций. Однако в целях более тесной увязки расчета с конструкцией желательно уже на первом этапе проектирования пользоваться также одним из пособий по конструированию трансформаторов [1].

Отдельные стадии расчета могут чередоваться в той или иной последовательности в зависимости от удобства выполнения этой работы, однако всегда следует придерживаться такого порядка, который обеспечивает наименьшую затрату времени и требует наименьшего числа повторных пересчетов. Для этого рекомендуется всю схему расчета строить так, чтобы заданные характеристики $P_к$, $P_х$, $u_к$ учитывались при выборе удельных нагрузок активных материалов, основных размеров и т. д. и подгонялись к норме на возможно более ранних стадиях расчета. Этим условиям отвечает приводимая ниже схема расчета электропечного трансформатора. Применительно к этой схеме построены изложение материала в книге и пример расчета трансформатора.

## 2-2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ВЫБОР СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБМОТОК

Расчет трансформатора начинается с определения основных электрических величин — мощности на одну фазу и стержень, номинальных токов обмоток ВН и НН, фазных токов и напряжений.

Мощность одной фазы трансформатора

$$S_ф = \frac{S}{m} \ [ква]. \qquad (2\text{-}1)$$

Мощность на одном стержне

$$S' = \frac{S}{c} \ [ква], \qquad (2\text{-}2)$$

где $c$ — число активных (несущих обмотки) стержней трансформатора; для стержневых трехфазных трансформаторов обычно $c=3$, для однофазных $c=2$.

Фазные напряжения для трехфазного трансформатора определяются по формулам:

---

[1] Например, книгой А. В. Сапожникова «Конструирование трансформаторов» (Госэнергоиздат, 1959).

для соединения в треугольник

$$U_ф = U \ [в]; \tag{2-3}$$

для соединения в звезду

$$U_ф = \frac{U}{\sqrt{3}} \ [в], \tag{2-3'}$$

где $U$ — линейное напряжение соответствующей обмотки.

Для определения изоляционных промежутков между обмотками и другими токоведущими частями и заземленными частями трансформатора существенное значение имеют испытательные напряжения, при которых проверяется электрическая прочность изоляции трансформатора. Эти испытательные напряжения определяются по номинальным напряжениям обмоток по табл. 3-1.

Номинальный (линейный) ток для трехфазного трансформатора:

на обмотке высшего напряжения (ВН)

$$I_1 = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_1} \ [а]; \tag{2-4}$$

на обмотке низшего напряжения

$$I_2 = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_2} \ [а]. \tag{2-4'}$$

Номинальные (линейные) токи для однофазного трансформатора определяются по формулам:

на обмотке высшего напряжения

$$I_1 = \frac{S \cdot 10^3}{U_1} \ [а]; \tag{2-5}$$

на обмотке низшего напряжения

$$I_2 = \frac{S \cdot 10^3}{U_2}. \tag{2-5'}$$

Для трехфазного трансформатора величина фазного тока — тока обмотки одного стержня — определяется по формулам:

для соединения обмоток в треугольник

$$I_ф = \frac{I}{\sqrt{3}} \ [а]; \tag{2-6}$$

для соединения обмоток в звезду

$$I_ф = I \; [a], \qquad (2\text{-}7)$$

где $I$ — линейный ток трансформатора.

При расчете трехфазного электропечного трансформатора, обмотка ВН которого пересоединяется с треугольника на звезду, линейный и фазный токи обмотки ВН рассчитываются по полной мощности трансформатора для соединения в треугольник. При соединении обмотки ВН в звезду мощность трансформатора и линейный ток обмотки ВН уменьшаются в $\sqrt{3}$ раз, а фазный ток остается прежним.

Линейный и фазный токи обмотки НН при обоих соединениях обмотки ВН остаются одинаковыми и рассчитываются по полной мощности трансформатора и максимальному напряжению обмотки НН. Вторичная обмотка (НН) каждого стержня чаще всего разделяется на несколько параллельных ветвей, токи в которых определяются в соответствии с принятой схемой обмотки и числом ветвей.

Первичная обмотка (ВН) обычно разделяется на части, соединенные последовательно. Примеры разделения обмоток одного стержня трехфазного трансформатора на параллельные и последовательные ветви, а также распределения витков, токов и напряжений между частями обмоток показаны на рис. 2-1. Подобную схему рекомендуется составлять при практическом расчете электропечного трансформатора во избежание ошибок в определении токов, напряжений и числа витков отдельных ветвей обмоток. При этом необходимо следить за тем, чтобы обмотки разделялись на симметричные магнитно-уравновешенные группы (см. § 1—2).

В непосредственной близости к ярму обычно располагаются крайние подгруппы обмотки НН, а подгруппы обмотки ВН располагаются между подгруппами НН. Такое расположение более компактно, так как расстояния крайних катушек обмотки от ярма в этом случае определяются по испытательному напряжению обмотки НН.

Показанное на рис. 2-2 расположение менее компактно, так как при размещении вблизи ярма подгрупп обмотки ВН расстояние до ярма определяется по более высокому испытательному напряжению обмотки ВН. Такое расположение обмоток, однако, также находит применение, так как оно дает возможность соединять последовательно подгруппы обмоток НН, что бывает удобно, например, при применении на стороне НН винтовой обмотки.

Фазные ток и напряжение однофазного трансформатора равны его номинальным току и напряжению. Ток и напряжение обмотки одного стержня в однофазном трансформаторе зависят от соединения обмоток стержней — последовательного или параллельного. В случае последовательного соединения обмоток двух стержней ток обмотки одного стержня равен номинальному току, а напряжение — половине номинального напряжения. При параллельном соеди-

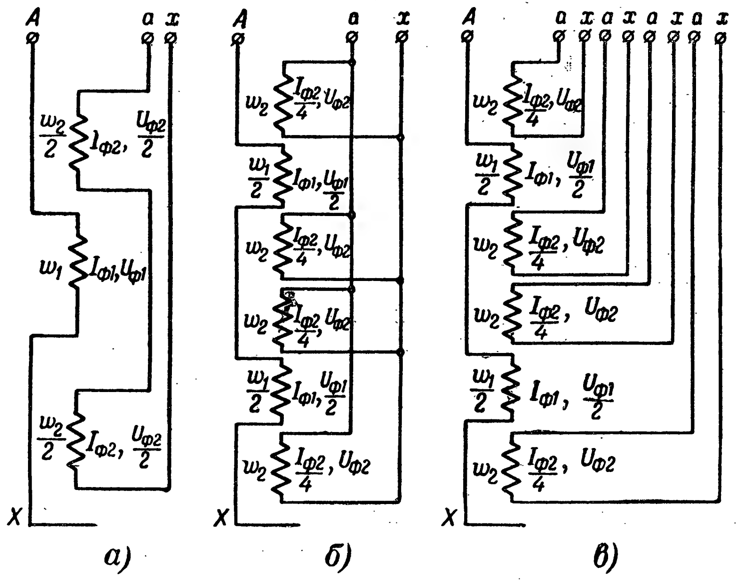



Рис. 2-1. Примеры разделения обмоток одного стержня трехфазного трансформатора на параллельные и последовательные ветви.

нении обмоток двух стержней ток обмотки одного стержня равен половине номинального тока, а напряжение — номинальному напряжению. В обоих случаях предполагается, что числа витков обмоток обоих стержней равны.

Чередующиеся обмотки одного стержня однофазного трансформатора разделяются на ветви, соединяемые так же, как и в трехфазном трансформаторе: параллельно или последовательно. Благодаря тому, что возможны различные соединения не только ветвей обмотки одного стержня, но и обмоток, расположенных на разных стержнях, число комбинаций параллельного и последовательного соединения ветвей у однофазного трансформатора больше, чем у

трехфазного. Пример схемы соединения обмоток однофазного трансформатора и распределения токов, напряжений и витков в обмотках показан на рис. 2-3.

При составлении схемы соединения обмоток трансформатора, особенно однофазного, следует обращать внимание на правильный выбор направления намотки обмоток. Так,

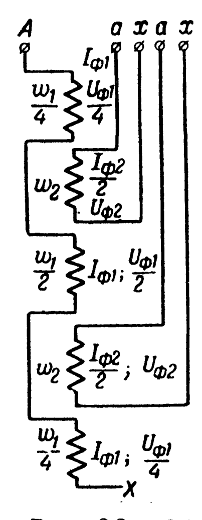



Рис. 2-2. Обмотка одного стержня трехфазного трансформатора при $n=4$ и двух параллельных ветвях в обмотке НН.

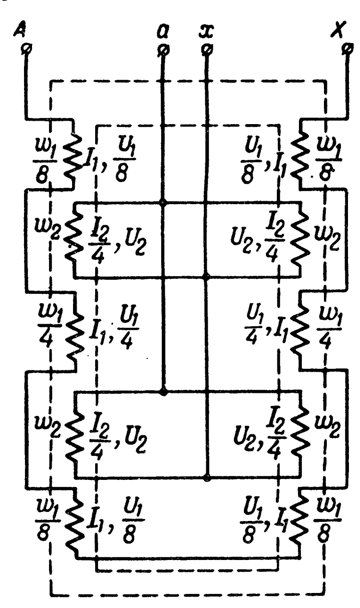



Рис. 2-3. Пример схемы соединения обмоток однофазного электропечного трансформатора.

например, для схемы, показанной на рис. 2-3, все части обмотки ВН обоих стержней должны иметь одинаковое направление намотки, т. е. все — правое или все — левое. Части обмотки НН, расположенные на разных стержнях, должны иметь разные направления намотки: на одном стержне — левое, на другом — правое.

Разбивка обмотки НН на параллельно и последовательно соединяемые ветви существенно зависит от выбора числа магнитно-уравновешенных подгрупп в чередующейся обмотке. Этот выбор связан прежде всего с заданным напряжением короткого замыкания трансформатора $u_к$, в основном определяемого реактивной составляющей $u_р$.

Из теории трансформаторов известно, что реактивная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора для концентрических и чередующихся обмоток следующим образом связана с их размерами и числом подгрупп:

$$u_p = \frac{a_p}{l_p} \cdot \frac{1}{n} k_p, \tag{2-8}$$

где $a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}$;

$l_p$ — по рис. 2-4;

$n$ — число магнитно-уравновешенных подгрупп обмотки (для концентрической обмотки $n = 1$);

$k_p$ — коэффициент, учитывающий отклонение реального поля рассеяния от идеального параллельного поля.

Для трансформаторов с концентрическими обмотками $k_p$ обычно лежит в пределах 0,9—1,0, для трансформаторов с чередующимися обмотками — в пределах 0,2—0,3 до 0,8—0,9 для числа подгрупп $n$ от 2 до 10—12.

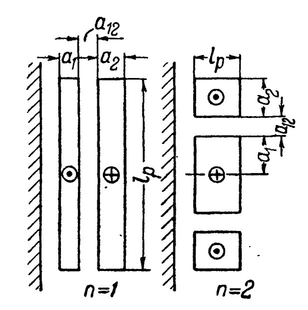


Рис. 2-4. К определению $u_p$ для концентрической и чередующейся обмоток.

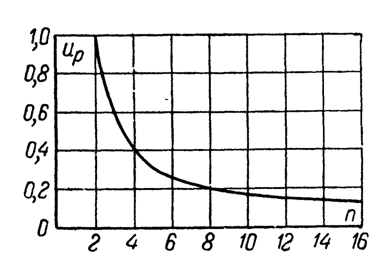


Рис. 2-5. Изменение $u_p$ с изменением числа подгрупп чередующейся обмотки.

На рис. 2-4 наглядно показано, что при одинаковых общих размерах и малом значении $n$ чередующаяся обмотка, имея значительно большее $a_p$ и меньшее $l_p$, позволяет получить существенно большее значение $u_p$, чем концентрическая. С ростом числа подгрупп $u_p$ чередующейся обмотки падает. Примерное изменение $u_p$ с увеличением числа подгрупп чередующейся обмотки с учетом изменения коэф-

фициента $k_р$ показано на рис. 2-5. При этом за единицу принято значение $u_р$ при $n=2$.

Выбор числа подгрупп обычно производится по заданному $u_к$ и может быть сделан по табл. 2-1.

Таблица 2-1

**Выбор числа подгрупп $n$ по заданному $u_к$**

| $u_к$ | 25—20% | 12—10% | 10—7% | 7—5% |
|---|---|---|---|---|
| $n$ | 2 | 4 | 6—8 | 8—12 |

Необходимо заметить, что увеличение числа подгрупп связано с увеличением числа изоляционных промежутков между обмотками ВН и НН, а следовательно, и с увеличением длины стержней сердечника и веса стали в них. Увеличение числа подгрупп также усложняет намотку и сборку обмоток, а также сборку и пайку отводов. Поэтому при выборе числа подгрупп всегда стараются придерживаться возможно меньших значений.

## 2-3. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И МАТЕРИАЛА СЕРДЕЧНИКА

Сердечник является магнитной цепью трансформатора, поэтому при его конструировании должны быть в первую очередь предусмотрены: получение возможно меньших основных и добавочных потерь в стали, минимальный ток холостого хода, минимальный расход трансформаторной стали и возможно больший коэффициент заполнения сталью пространства внутри обмоток. Сердечник служит также и механической основой трансформатора; на нем располагаются и укрепляются обмотки и отводы, на нем же в процессе сборки трансформатора укрепляется крышка бака с проходными изоляторами (вводами) и различной арматурой. Вследствие этого одним из основных требований, предъявляемых к сердечнику, является требование механической прочности и устойчивости.

Поперечное сечение стержня в стержневых сердечниках обычно имеет вид симметричный ступенчатой фигуры, вписанной в окружность (рис. 2-6). Диаметр этой окружности $d$ называется диаметром стержня трансформатора и является одним из основных его размеров. Чистое сечение

стали в поперечном сечении стержня или ярма называется активным сечением стержня или ярма. Число ступеней, определяемое по числу углов стержня в четверти круга, может быть различным. Увеличение числа ступеней увеличивает коэффициент заполнения площади круга площадью ступенчатой фигуры, но одновременно увеличивает число типов пластин сердечника, имеющих различные размеры, чем усложняет заготовку пластин и сборку сердечника. Поэтому в практике стараются ограничить число ступеней

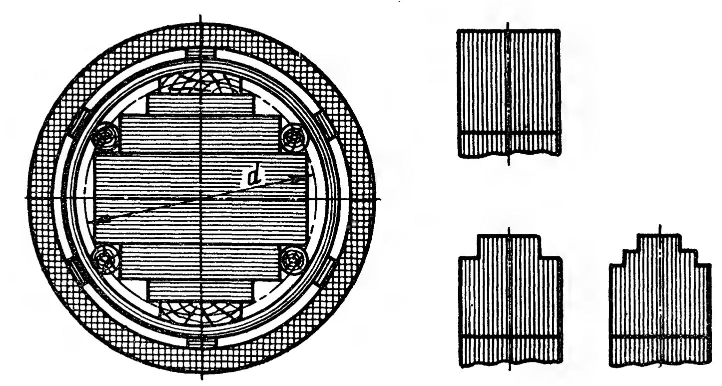



Рис. 2-6. Прессовка стержня путем расклинивания с жестким бумажно-бакелитовым цилиндром обмотки НН.

Рис. 2-7. Различные формы сечения ярма.

и обычно берут его равным от 2—3 до 7—8 и не более 9—10. Для ориентировки в этом вопросе может служить табл. 2-2.

В целях упрощения сборки сердечника и уменьшения числа типов пластин с различными размерами, а также упрощения опорных конструкций обмоток, форму сечения ярма берут обычно более простой, чем форму сечения стержня. Наиболее употребительными для электропечных трансформаторов являются формы сечения ярма, показанные на рис. 2-7.

Вследствие неравенства сечений отдельных пакетов листов ярма и соответствующих пакетов стержня возникает неравномерное распределение магнитного потока и индукции между различными пакетами сердечника. Неравномерное распределение индукции в свою очередь приводит к увеличению потерь и тока холостого хода — большему при прямоугольной форме ярма и меньшему при ступенчатой

форме, более близкой к форме поперечного сечения стержня. Для уменьшения этих добавочных потерь и снижения тока холостого хода трансформатора без усложнения сборки сердечника часто прибегают к уменьшению средней индукции в ярме, увеличивая активное сечение ярма по сравнению с активным сечением стержня на 5—15% и сохраняя форму сечения ярма прямоугольной или с двумя-тремя ступенями.

Таблица 2-2

**Число ступеней в сечении стержня современных масляных трансформаторов**

| Мощность на стержень *S'*, *ква* | До 5 | 5—15 | 15—45 | 45—5 000 | 5 000—20 000 | Более 20 000 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Число ступеней | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Ориентировочный диаметр *d* стержня, *см* | 8 | 8—12 | 12—16 | 16—51 | 51—79 | 79—86 | 86—94 | 94—100 |

Ярма и стержни сердечника, собранного из пластин, должны быть скреплены так, чтобы весь сердечник представлял собой достаточно жесткую конструкцию. Стяжка сердечника должна обеспечивать отсутствие вибрации листов и ненормального гудения при работе трансформатора с номинальной частотой. Практика показывает, что оба эти требования достаточно хорошо удовлетворяются при равномерно распределенном напряжении сжатия между листами в наиболее широком пакете ярма, равном 1 *кг/см* и стержня — 2—3 *кГ/см*$^2$. Такая сила сжатия в ярмах обеспечивается путем запрессовки ярма между двумя прессующими балками, стянутыми шпильками.

Прессовка стержней может осуществляться различными способами. При диаметре стержня $d < 35$ *см* и мощности на один стержень $S' \leqslant 1\,000$ *ква* хорошие результаты дает прессовка его путем забивания деревянных планок или стержней между стержнем сердечника и жестким изоляционным цилиндром обмотки НН (рис. 2-6). Стержни диаметром более 35 *см* (при $S' > 1\,000$ *ква*) нуждаются в более надежной прессовке, которая может быть осуществлена, например, стяжными шпильками так, как это показано на рис. 2-8.

Таблица 2-3

**Число и размеры продольных каналов в стержнях масляных трансформаторов**

| Мощность на стержень $S'$, *ква* | До 1 000 | 1 000—1 400 | 1 400—3 300 | 3 300—6 700 | 6 700—10 000 | 10 000—20 000 | Более 20 000 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Диаметр стержня $d$, *см* | До 35 | 35—39 | 39—47 | 47—59 | 59—66 | 66—78 | 78—94 | 94—100 |
| Число каналов | — | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Ширина канала $b_к$, *см* | — | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |

Стержни с диаметром до 35 *см* обычно хорошо охлаждаются маслом, омывающим их наружную поверхность. При диаметре 35 *см* и выше для обеспечения надежного охлаждения внутренних частей стержня между его пакетами делаются продольные (вдоль листов) охлаждающие каналы. Размеры и число каналов в современных трансформаторах при различных диаметрах стержня приведены в табл. 2-3.

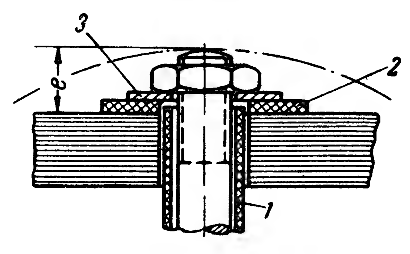



Рис. 2-8. Деталь прессовки стержня стяжными шпильками.

*1* — трубка изоляционная; *2*—шайба изоляционная; *3* — шайба стальная.

Продольные по отношению к листам каналы стержня продолжаются в ярмах. В мощных однофазных трансформаторах при диаметре стержня более 50 *см* делают также обычно один поперечный (поперек листов) канал шириной 1,2—2,0 *см*.

Необходимость оставления места для стяжных деталей и выполнения охлаждающих каналов, естественно, уменьшает коэффициент $k_{кр}$ заполнения площади круга площадью ступенчатой фигуры, равный отношению площади ступенчатой фигуры $П_ф$ к площади круга, в который вписано поперечное сечение стержня:

$$k_{кр} = \frac{П_ф}{\frac{\pi d^2}{4}}.$$

Ориентировочные практические значения этого коэффициента для различного числа ступеней с учетом охлаждающих каналов приведены в табл. 2-4. Данными этой табли-

цы можно пользоваться при предварительном расчете. При окончательном расчете магнитной цепи сечение стержня $П_с$ определяется по реальным размерам пакетов стержня.

Таблица 2-4

**Значения коэффициента заполнения $k_{кр}$ для различного числа ступеней с учетом каналов (для предварительного расчета)**

| | Запрессовка стержня расклиниванием с обмоткой НН | | | | | | Запрессовка стержня шпильками | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Число ступеней | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Значения $k_{кр}$ | 0,636 | 0,786 | 0,851 | 0,886 | 0,908 | 0,920 | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,95 |

Примечание. При наличии каналов значение $k_{кр}$, найденное по таблице, уменьшается на 0,015 для каждого продольного канала и на 0,02—для поперечного канала.

Материалом для сердечника трансформатора служит электротехническая тонколистовая высоколегированная горячекатаная сталь марок Э41 и Э42 или холоднокатаная текстурованная повышенно легированная сталь марок Э310, Э320 или Э330. Основные данные стали этих марок по ГОСТ 802-54 приведены в табл. 2-5. Обозначения марок стали расшифровываются следующим образом: Э — электротехническая; первая цифра — 4 — высоколегированная (с содержанием кремния 4,0—4,8%) — 3— повышеннолегированная (с содержанием кремния 2,5—3,5%); вторая цифра — 1, 2 и 3 обозначает, что для этой марки гарантированы определенные удельные потери при перемагничивании стали с частотой 50 *гц* и магнитная индукция в сильных полях; цифра 0 обозначает, что сталь холоднокатаная текстурованная.

Горячекатаная сталь марок Э41 и Э42 допускает индукцию в сердечнике $B = 14\,500 \div 14\,700$ *гс*. Марки стали Э310 и Э320, обладающие пониженными потерями и повышенной проницаемостью, позволяют повысить индукцию до 16 000—16 500 *гс*, а марка Э330 — до 17 000 *гс*. Такое повышение индукции дает возможность уменьшить вес стали, сделать сердечник более компактным и уменьшить вследствие этого вес меди обмоток. Вместе с уменьшением веса уменьшаются также и габариты трансформатора. Обладая этими ценными качествами, холоднокатаная сталь является в то же время более дорогим материалом. Соот-

Таблица 2-5

**Основные характеристики марок трансформаторной стали**

| Марка стали | Толщина листов, *мм* | Индукция $B_n$ при *n*, *ав/см* не менее, *гс* | | | Удельные потери, *вт/кг* при $f=50$ *гц* | | | Размер листов, *мм×мм* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $B_{10}$ | $B_{25}$ | $B_{50}$ | $B=10\,000$ | $B=15\,000$ | $B=17\,000$ | |
| Э41 | 0,35<br>0,50 | 13 000<br>13 000 | 14 500<br>14 500 | 15 600<br>15 600 | 1,35<br>1,60 | 3,20<br>3,40 | —<br>— | 750×1 500 и 1 000×2 000 |
| Э42 | 0,35<br>0,50 | 12 900<br>12 900 | 14 400<br>14 400 | 15 500<br>15 500 | 1,20<br>1,40 | 2,80<br>3,20 | —<br>— | |
| Э310 | 0,35<br>0,50 | 15 700<br>15 700 | 17 000<br>17 000 | 18 000<br>18 000 | 1,00<br>1,25 | 2,20<br>2,80 | 3,20<br>3,80 | 750×1 500 |
| Э320 | 0,35<br>0,50 | 16 500<br>16 500 | 18 000<br>18 000 | 18 700<br>18 700 | 0,90<br>1,15 | 1,90<br>2,50 | 2,90<br>3,50 | |
| Э330 | 0,35<br>0,50 | 17 000<br>17 000 | 18 500<br>18 500 | 19 000<br>19 000 | 0,80<br>1,05 | 1,70<br>2,30 | 2,60<br>3,20 | |

ношение цен различных марок стали приведено в табл. 2-7. В последние годы холоднокатаная сталь находит все более широкое применение в нормальных силовых, специальных, а также в мощных и высоковольтных трансформаторах. Несомненно, что вместе с широким внедрением холоднокатанной стали, развитием ее производства и улучшением технологии обработки будут снижаться как удельные потери, так и цены на сталь этих марок.

Листы трансформаторной стали, заготовленные для сборки сердечника, должны быть надежно изолированы один от другого. Междулистовая изоляция может осуществляться путем односторонней оклейки листов тонким слоем ($\delta=0{,}03$ *мм*) специальной оклеечной бумаги (ГОСТ 1201-41) или путем двустороннего покрытия непроводящей пленкой. В качестве такого покрытия может применяться специальный масляный лак, например № 202, с последующим запеканием его пленки при температуре 450—550° С.

Лаковая изоляция, имея пленку более тонкую, чем толщина оклеечной бумаги, позволяет получить более высокий коэффициент заполнения поперечного сечения стержня (или ярма) и представляет некоторые преимущества в процессе заготовки листов стали для сердечника, а также, обладая большей, чем бумага, теплопроводностью, обеспечивает лучшее охлаждение. Нагревостойкость лаковой пленки также выше, чем нагревостойкость бумаги. Оклейка бумагой обеспечивает более совершенную и надежную электрическую изоляцию между листами сердечника, а также обходится значительно дешевле лаковой изоляции. В практике лаковая междулистовая изоляция находит применение главным образом в трансформаторах с мощностью на один стержень $S'=1\,800$ *ква* и выше, у которых вопросы обеспечения лучшего охлаждения, а также получения наибольшего коэффициента заполнения $k_з$ играют решающую роль. В трансформаторах меньшей мощности, как правило, применяется бумажная изоляция.

Коэффициенты заполнения $k_з=\frac{П_с}{П_ф}$, равные отношению чистой площади стали в сечении стержня (или ярма) активного сечения $П_с$ к площади ступенчатой фигуры $П_ф$, для разных толщин стали и обоих видов междулистовой изоляции приведены в табл. 2-6. Эти значения $k_з$ учитывают как толщину изоляционного слоя, так и неплотность запрессовки листов.

Таблица 2-6

**Значения коэффициента $k_з$**

| Толщина листов стали, *мм* | Изоляция | |
|---|---|---|
| | Бумага | Лак |
| 0,35 | 0,85 | 0,91 |
| 0,5 | 0,875 | 0,92 |

Общий коэффициент заполнения сталью площади круга, описанного около сечения стержня $k_с$, является произведением двух коэффициентов:

$$k_с = k_{кр} k_з. \quad (2\text{-}9)$$

В практике трансформаторостроения получили применение обе стандартные толщины листов стали: 0,35 и 0,5 *мм*. Вследствие меньшей толщины листов сталь 0,35 имеет более высокую цену, дает меньший коэффициент заполнения, чем сталь 0,5, а также требует большего числа пластин для получения пакета заданной толщины, а следовательно, и большего числа операций по резке, штамповке и шлифовке пластин и сборке сердечника. С другой стороны, сталь 0,35 имеет существенно меньшие удельные потери.

Для наглядности сравнение этих двух толщин листов стали приведено в табл. 2-7.

Таблица 2-7

**Сравнение стали $\delta$=0,5 *мм* со сталью $\delta$=0,35 *мм***

| | Марка | Удельные потери при $B$=10 000 *вт/кг* | Цена за 1 *т* (цены 1956 г.), руб. | Коэффициент заполнения | Отношение числа листов в пакетах равной толщины | Отношение стоимости изолирования 1 *т* стали |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Сталь, $\delta$=0,5 *мм* | Э41<br>Э42<br>Э310<br>Э320<br>Э330 | 1,60<br>1,42<br>1,25<br>1,15<br>1,05 | 1 561<br>1 743<br>2 106<br>2 353<br>2 601 | 0,875—0,92 | 1,00 | 1,00 |
| Сталь, $\delta$=0,35 *мм* | Э41<br>Э42<br>Э310<br>Э320<br>Э330 | 1,35<br>1,20<br>1,00<br>0,90<br>0,80 | 2 085<br>2 289<br>2 274<br>2 588<br>2 861 | 0,85—0,91 | 1,39 | 1,43 |

Из табл. 2-7 следует, что сталь с $\delta$=0,35 *мм* имеет существенное преимущество перед сталью с $\delta$=0,5 *мм* по удельным потерям, которые в этой стали на 15—20% ниже, чем в стали с $\delta$=0,5 *мм*. По остальным показателям — цене, коэффициенту заполнения, стоимости обработки — пре-

имущество на стороне стали с $\delta=0{,}5$ *мм*. Тем не менее благодаря значительно пониженным потерям холоднокатаная сталь толщиной $\delta=0{,}35$ *мм* получает все более широкое применение в тех трансформаторах, где требование получения наименьших потерь является доминирующим, в частности в мощных трансформаторах с напряжением 220 и 400 *кв*, а также в электропечных трансформаторах.

## 2-4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

Сердечник трансформатора является основой его конструкции, и выбор главных размеров сердечника определяет также и главные размеры обмоток: диаметры и высоту. Рассмотрим стержневой трансформатор со стержнями, имеющими поперечное сечение в форме симметричной ступенчатой фигуры, вписанной в окружность, и чередующимися обмотками. Один стержень такого трансформатора с обмотками изображен на рис. 2-9. Диаметр $d$ окружности, в которую вписано ступенчатое сечение стержня, является одним из его основных размеров. Вторым основным размером трансформатора является осевой размер $l$ (высота) его обмоток. Третьим основным размером трансформатора является средний диаметр витка двух обмоток $d_{12}$.

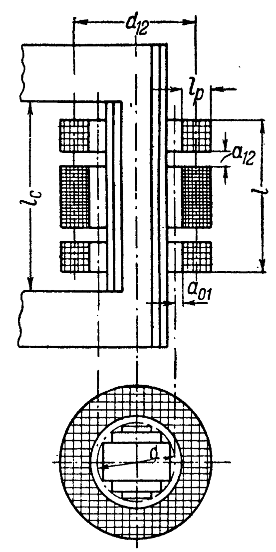



Рис. 2-9. Обозначение основных размеров трансформатора.

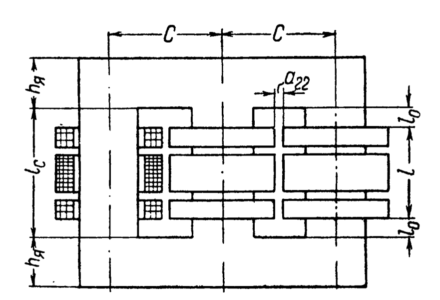



Рис. 2-10. Обозначение основных размеров трансформатора.

Если эти три размера выбраны или известны, то остальные размеры, определяющие конфигурацию и объем сердечника и обмоток, например высота стержня $l_c$, рас-

стояние между осями стержней $C$ и т. д., могут быть легко найдены, если известны минимально допустимые изоляционные расстояния от обмоток ВН ($a_{01}$, $a_{22}$) и НН ($l_0$) до заземленных частей и других обмоток (рис. 2-9 и 2-10).

В серии, включающей ряд трансформаторов различных мощностей, вместе с ростом мощности трансформатора, естественно, возрастают его линейные геометрические размеры. Связь между возрастанием мощности трансформатора и его размерами определяется общеизвестным законом [1]. Предположим, что в пределах всей серии соотношения между отдельными линейными размерами сохраняются постоянными, т. е. что все трансформаторы данной серии представляют собой геометрически подобные фигуры. Далее, предположим, что электромагнитные нагрузки активных материалов — плотность тока в обмотках и индукция в сердечниках всей серии — также остаются неизменными.

Мощность обмоток одного стержня трансформатора может быть записана так:

$$S' = UI,$$

где $U$ — напряжение; $I$ — ток обмотки стержня.

Заменяя $U = u_{в}w$ и $I = \Delta \Pi$, где $u_{в}$ — напряжение одного витка; $w$ — число витков обмотки стержня; $\Delta$ — плотность тока в обмотках и $\Pi$ — сечение одного витка обмотки, получаем:

$$S' = u_{в}w\Delta\Pi.$$

Далее, замечая, что $u_{в} = 4{,}44 f B_{с} \Pi_{с} \cdot 10^{-8}$, где $B_{с}$ — индукция в стержне, и активное сечение стержня $\Pi_{с} = \frac{\pi d^2}{4} k_{с}$, находим:

$$S' = (1{,}11\pi \cdot 10^{-8} k_{с} f)(B_{с}\Delta_{с})(d^2 w \Pi). \qquad (2\text{-}10)$$

Первая и вторая скобки правой части этого выражения для данной серии являются величинами постоянными и могут быть заменены постоянным коэффициентом $K$. Тогда полная мощность трансформатора на $c$ стержнях

$$S = cS' = Kc(d^2 w \Pi). \qquad (2\text{-}11)$$

---

[1] Некоторые положения этого закона установлены М. О. Доливо-Добровольским, полностью формулировка закона принадлежит М. Видмару.

Произведение $w\Pi$ представляет собой площадь сечения всех витков обмотки, т. е. величину, пропорциональную квадрату линейного размера трансформатора. Таким образом, все выражение, стоящее в скобках $(d^2 w\Pi)$, поскольку соотношение линейных размеров остается в пределах серии неизменным, оказывается пропорциональным четвертой степени любого линейного размера $l$, или

$$S \equiv l^4. \tag{2-12}$$

Отсюда следует, что линейные размеры трансформатора возрастают пропорционально корню четвертой степени из мощности:

$$l \equiv S^{1/4}. \tag{2-13}$$

Напряжение одного витка пропорционально $d^2 \equiv l^2$, или

$$u_в \equiv S^{1/2}. \tag{2-14}$$

Вес активных материалов трансформатора — стали $G_{ст}$ и меди $G_м$ — возрастает пропорционально кубу его линейных размеров, или

$$G \equiv l^3 \equiv S^{3/4}. \tag{2-15}$$

Расход активных материалов на единицу мощности трансформатора изменяется пропорционально:

$$g = \frac{G}{S} \equiv \frac{S^{3/4}}{S} = \frac{1}{S^{1/4}}, \tag{2-16}$$

т. е. падает с ростом мощности. Потери в активных материалах стали и меди $\Sigma P$ при сохранении неизменными электромагнитных нагрузок пропорциональны их весам или объемам, и следовательно, полные потери

$$\Sigma P \equiv S^{3/4}; \tag{2-17}$$

потери на единицу мощности

$$p = \frac{\Sigma P}{S} \equiv \frac{1}{S^{1/4}}, \tag{2-18}$$

т. е. потери на единицу мощности падают вместе с ростом мощности трансформатора, а к. п. д. трансформатора соответственно возрастает.

Внешняя охлаждаемая воздухом поверхность трансформатора, естественно, растет пропорционально квадрату линейных размеров ($l^2 \equiv S^{1/2}$), а потери $q$, отнесенные к единице поверхности, также возрастают:

$$q \equiv \frac{\Sigma P}{l^2} = \frac{S^{3/4}}{S^{1/2}} = S^{1/4}. \qquad (2\text{-}19)$$

Для того чтобы температура трансформатора не изменялась с изменением мощности, необходимо постоянство $q$ независимо от мощности. Этого можно достигнуть путем искусственного развития охлаждаемой поверхности и применения специальных охладителей. Проблема охлаждения мощных трансформаторов может быть также решена за счет применения форсированного воздушного или водомасляного охлаждения.

В реальных современных сериях трансформаторов предположение геометрического подобия полностью не соблюдается, и соотношения мощностей, потерь, весов и размеров трансформаторов одной серии несколько отклоняются от выведенных выше простых законов. Однако тенденция уменьшения расхода материалов и повышения к. п. д. с ростом мощности в одном трансформаторе выявляется достаточно ясно. Это наглядно показано в табл. 2-8, где приведены некоторые данные отдельных электропечных трансформаторов разных мощностей, иллюстрирующие эти положения.

Таблица 2-8

**Изменение веса активных материалов и потерь трансформатора, отнесенных к его мощности, для современных электропечных трехфазных масляных трансформаторов**

| Мощность, *ква* | 400 | 1 500 | 3 500 | 8 000 | 21 000 |
|---|---|---|---|---|---|
| Номинальное напряжение ВН, *кв* | 6 | 6 | 10 | 10 | 35 |
| Расход меди $g_{м}$, *кг/ква* | 0,51 | 0,364 | 0,32 | 0,18 | 0,149 |
| Расход стали $g_{ст}$, *кг/ква* | 2,05 | 1,50 | 1,43 | 0,92 | 0,95 |
| Потери короткого замыкания $p_{к}$, *вт/ква* | 20,0 | 14,7 | 15,7 | 13,5 | 6,9 |
| Потери холостого хода $p_{х}$, *вт/ква* | 6,33 | 5,05 | 3,74 | 2,68 | 2,96 |

Теория и практика расчета показывают, что выбор основных размеров трансформатора оказывает существенное влияние как на стоимость материалов трансформато-

ра, так и на его характеристики — потери и напряжение короткого замыкания, потери и ток холостого хода, на механическую прочность обмоток при коротком замыкании. При расчете нормальных силовых трансформаторов выбор основных размеров может быть произведен и обычно производится с учетом получения в результате расчета трансформатора, оптимального по стоимости и обладающего всеми заданными характеристиками.

При расчете электропечного трансформатора выбор основных размеров связан с дополнительными ограничениями, которые часто оказывают на него решающее влияние.

Вместе с ростом мощности и геометрических размеров трансформатора возрастает и напряжение витка его обмоток $u_в = 4{,}44 f B_с П_с \cdot 10^{-8}$. Выше было показано, что $u_в \equiv \equiv d^2 \equiv \sqrt{S}$. Это общее положение справедливо также и для электропечного трансформатора, однако в то время как в нормальном силовом трансформаторе вместе с ростом мощности обычно растет и номинальное напряжение обмоток, в электропечном трансформаторе напряжение обмотки НН почти не изменяется с изменением мощности. Вследствие этого с увеличением мощности электропечного трансформатора число витков его обмотки НН заметно уменьшается. Это наглядно показано в табл. 2-9, где приведены примерное число витков обмотки НН и напряжение одного витка для ряда электропечных трансформаторов разных мощностей.

Напряжение НН — $U_2$, число витков НН — $w_2$, напряжение витка — $u_в$ для трехфазных электропечных трансформаторов разных мощностей.

Таблица 2-9

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $S$, *ква* | 400 | 1 000 | 1 800 | 2 800 | 5 000 | 9 000 | 15 000 | 25 000 |
| $U_2$, *в* | 212 | 224 | 245 | 260 | 280 | 320 | 360 | 420 |
| $w_2$ | 22 | 15 | 12 | 10 | 8 | 7 | 6 | 5 |
| $u_в$, *в* | 9,64 | 14,95 | 20,4 | 26,0 | 35,0 | 45,7 | 60 | 84 |

Число витков обмотки одного стержня не может быть дробным. Поэтому напряжение витка не может выбираться произвольно и всегда связано с напряжением обмотки и возможным целым числом витков. Табл. 2-9 показывает, что изменение числа витков обмотки НН на единицу для электропечных трансформаторов изменяет $u_в$ в зависимости от мощности на 5 — 20%.

Столь существенное изменение $u_в$ может быть сделано только за счет изменения диаметра и активного сечения стержня, так как изменение индукции более чем на $\pm 1-2\%$ приводит к существенному увеличению потерь и тока холостого хода или неоправданному увеличению веса стали сердечника.

Таким образом, диаметр стержня электропечного трансформатора оказывается жестко связанным с ограниченным числом витков обмотки НН и выбираться произвольно не может. Поэтому при выборе диаметра стержня удобно связать его с возможным целым числом витков обмотки НН и напряжением одного витка.

Исходя из выражения $u_в = 4{,}44 f B_с П_с \cdot 10^{-8}$, заменяя $П_с = k_с \frac{\pi d^2}{4}$ и решая уравнение относительно $d$, получим:

$$d = \sqrt{\frac{u_в \cdot 10^8}{1{,}11 \pi f B_с k_с}} \; [см]. \qquad (2\text{-}20)$$

В выражение (2-20) входят величины: заданные, как, например, частота сети $f$ *гц*; выбираемые в начале расчета—индукция в стержне $B_с$ *гс* и коэффициент заполнения сечения стержня $k_с$ и, наконец, напряжение одного витка обмотки $u_в$, которое, как видно из табл. 2-9, связано с мощностью трансформатора и может быть ориентировочно выбрано применительно к мощности. Поэтому выражение (2-20) может служить для определения основного размера трансформатора — диаметра стержня, которое рекомендуется производить в следующем порядке:

1. Определяется ориентировочное значение напряжения одного витка обмотки по формуле

$$u'_в = (0{,}8 \div 0{,}9)\sqrt{S'} \; [в], \qquad (2\text{-}21)$$

где $S'$ — мощность на один стержень трансформатора, определяемая по формуле (2-2):

$$S' = \frac{S}{c}, \; [ква],$$

где $S$ [*ква*] — мощность трансформатора по заданию;
$c$ — число активных (несущих обмотки) стержней трансформатора; для трехфазного трансформатора $c = 3$, для однофазного $c = 2$.

Выбор напряжения витка по формуле (2-21) позволяет рассчитать трансформатор со стоимостью активных материалов, близкой к оптимальной. При выборе коэффициента в этой формуле ближе к 0,8 трансформатор получается с относительно меньшим весом стали и бо́льшим весом меди. При коэффициенте, близком к 0,9, увеличивается вес стали и уменьшается вес меди.

2. Определяется число витков обмотки НН по формуле

$$w_2' = \frac{U_{2ф}}{u_в'}. \qquad (2\text{-}22)$$

Полученное число витков $w_2'$ округляется до ближайшего целого числа $w_2$, и затем уточняется напряжение одного витка по формуле

$$u_в = \frac{U_{2ф}}{w_2} \ [в]. \qquad (2\text{-}23)$$

3. Согласно указаниям § 2-3 производится выбор числа ступеней в поперечном сечении стержня, способа запрессовки стержня, числа и размеров охлаждающих каналов, толщины листов стали, способа изоляции стали. Затем определяются коэффициенты заполнения $k_{кр}$ и $k_з$ и подсчитывается общий коэффициент заполнения:

$$k_с = k_{кр} k_з.$$

4. Индукция в стержне $B_с$ выбирается применительно к выбранной марке стали. Для электропечных масляных трансформаторов, мощность одного стержня $S'$ которых обычно выше 35 *ква*, можно рекомендовать следующие значения индукции: для горячекатаной стали марок Э41 и Э42 $B_с = 14\,000 \div 14\,500$ *гс*; для холоднокатаной стали марок Э310 и Э320 $B_с = 16\,000 - 16\,500$ *гс*, для марки Э330 $B_с = 16\,000 - 17\,000$ *гс*. При повышении индукции против указанных максимальных значений сильно возрастают потери и ток холостого хода. Уменьшение индукции хотя и дает снижение потерь и тока холостого хода, однако приводит к увеличению веса и стоимости активных материалов — стали сердечника и меди обмоток.

5. По формуле (2-20) определяется диаметр стержня

$$d = \sqrt{\frac{u_в \cdot 10^8}{1{,}11 \pi f B_с k_с}} \ [см].$$

Полученное значение $d$ может округляться в пределах до $1\%$ от $d$.

6. После определения диаметра стержня подсчитывается активное сечение стержня:

$$П_с = \frac{\pi d^2}{4} k_с \ [см^2] \qquad (2\text{-}24)$$

и определяется действительная индукция в стержне:

$$B_с = \frac{u_в \cdot 10^8}{4{,}44 f П_с} \ [гс]. \qquad (2\text{-}25)$$

В формулы (2-20) и (2-25) при определении $d$ и $B_с$ следует подставить значение $u_в$, уточненное по формуле (2-23).

Второй основной размер — средний диаметр витка двух обмоток трансформатора $d_{12}$ (рис. 2-10) может быть предварительно определен по приближенной формуле

$$d_{12} \approx ad \ [см], \qquad (2\text{-}26)$$

где $a$ для электропечных трансформаторов мощностью 400—25 000 *ква* может быть принято равным 1,40—1,42.

Выбор третьего основного размера — высоты обмотки $l$ (рис. 2-9) связан с выбором конфигурации всего трансформатора, которую удобнее всего характеризовать при помощи $\beta$ — отношения средней длины витка двух обмоток $\pi d_{12}$ к высоте обмотки $l$:

$$\beta = \frac{\pi d_{12}}{l}. \qquad (2\text{-}27)$$

Величина $\beta$ определяет соотношение между шириной и высотой трансформатора. В нормальных силовых трансформаторах величина $\beta$ в существующих сериях варьируется в широких пределах от $\beta = 1{,}4$ до $\beta = 3{,}5$. При этом меньшим значениям $\beta$ соответствуют трансформаторы относительно узкие и высокие, бо́льшим — широкие и низкие.

При проектировании электропечных трансформаторов величину $\beta$ выбирают в более узких пределах. При выборе следует считаться с тем, что в том случае, когда диаметр стержня определяется независимо от выбора $\beta$, как это имеет место при расчете электропечных трансформаторов, малым значениям $\beta$ соответствуют увеличение веса стали и уменьшение веса меди, а большим — уменьшение веса стали и увеличение веса меди трансформатора. В этом случае напряжение короткого замыкания растет с уменьшением $\beta$ и падает с его увеличением.

Величина $\beta$ для электропечного трансформатора при

условии получения стоимости активных материалов, близкой к оптимальной, может быть выбрана в пределах 1,7—2,1. При этом меньшие значения β, близкие к 1,7, выбираются в том случае, когда полученное по формуле (2-23) напряжение одного витка $u_в$ ближе к $0{,}8\sqrt{S'}$ [формула (2-21)], а бо́льшие значения β, близкие к 2,1, выбираются тогда, когда $u_в$ ближе к $0{,}9\sqrt{S'}$. После выбора β определяется ориентировочная высота обмотки:

$$l = \frac{\pi d_{12}}{\beta} \ [см]. \tag{2-28}$$

В том случае, когда трансформатор выполняется с регулированием напряжения, обмотка ВН рассчитывается на повышенное число витков и величину $l$, найденную по формуле (2-28), следует увеличить на 8—10% при 4 ступенях напряжения НН и до 20—25% — при 8—12 ступенях.

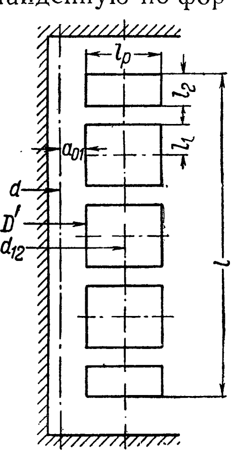



Рис. 2-11. Размещение чередующейся обмотки на стержне трансформатора ($n = 4$).

При размещении обмоток на стержне трансформатора необходимо не только выдержать размер $l$, но также произвести разбивку обмоток на $n$ подгрупп и обеспечить надежную изоляцию как обмоток ВН и НН от заземленных частей, так и обмоток ВН и НН друг от друга.

При определении места, занимаемого обмотками, прежде всего нужно определить изоляционные расстояния от обмотки до стержня $a_{01}$ и между обмотками ВН и НН $a_{12}$. Величины этих изоляционных расстояний зависят от конструкции и материала изоляции в соответствующих промежутках и определяются согласно указаниям, данным в гл. 3 (табл. 3-2) по испытательному напряжению обмотки ВН. При этом расстояние $a_{01}$ определяется между внутренней поверхностью обмотки ВН и внешней цилиндрической поверхностью стержня диаметром $d$ (рис. 2-11).

После определения $a_{01}$ можно найти внутренний диаметр обмоток, как правило всегда одинаковый для обмоток ВН и НН:

$$D'_1 = D'_2 = d + 2a_{01} \ [см]. \tag{2-29}$$

Обмотки одного стержня разбиваются на $n$ магнитно-уравновешенных подгрупп так, как это показано на рис. 2-11, где $n=4$. Высота, занимаемая одной подгруппой, $l_{пгр}$ определяется по формуле

$$l_{пгр}=\frac{l}{n}\ [см], \tag{2-30}$$

где $l$ определено по формуле (2-28) без увеличения на $8-25\%$.

Высоты обмоток ВН и НН в одной подгруппе $l_1$ и $l_2$ могут несколько отличаться одна от другой, однако в первом приближении их можно принять равными и считать

$$l_1 \approx l_2 = \frac{l_{пгр}-a_{12}}{2}\ [см]. \tag{2-31}$$

Высота зоны, занимаемой регулировочными витками обмотки ВН, определяется по формуле

$$l_{рег}=(0{,}08 \div 0{,}25)\,l.$$

При расчете обмотки должны быть размещены так, чтобы были выдержаны полученные основные размеры. При этом в целях получения надлежащей прочности изоляции $D'$ нельзя брать меньше полученного по формуле (2-29) и $a_{12}$ — меньше найденного по табл. 3-2, а величины $l_1$, $l_2$, $l_{пгр}$ можно варьировать в пределах $\pm 10\%$ так, чтобы действительное значение $l$ отличалось от найденного по формуле (2-28) ориентировочного значения не более чем на $\pm 5\%$.

Определение размеров стержня и обмоток, проводимое в начале расчета, является предварительным. В дальнейшем, при проведении полного расчета обмоток и сердечника, эти размеры могут быть несколько изменены. Поэтому при расчете характеристик короткого замыкания и холостого хода и других подсчетах, которые проводятся в конце расчета, после окончательной раскладки обмоток и определения реальных размеров сердечника следует пользоваться не предварительными полученными здесь значениями $d_{12}$, $l$, $l_{пгр}$, $l_1$, $l_2$, $П_с$, $B_с$, а этими размерами и величинами, найденными для реальных обмоток и сердечника.

# ГЛАВА ТРЕТЬЯ

# ИЗОЛЯЦИЯ В ЭЛЕКТРОПЕЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

## 3-1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

К изоляции трансформатора относятся конструкции, детали и материалы, которые служат для изолирования токоведущих частей, т. е. обмоток, отводов, переключателей ступеней напряжения и вводов между собой и от заземленных частей трансформатора. Обмотки, отводы и переключатели размещаются обычно внутри бака, залитого маслом, а вводы служат для подвода к ним напряжения извне трансформатора. В соответствии с этим изоляцию масляного трансформатора можно подразделить на изоляцию в масле, в том числе погруженной части вводов, и изоляцию внешней части вводов в воздухе.

Изоляция обмоток может быть подразделена на: 1) главную (или внешнюю) изоляцию, т. е. изоляцию каждой из обмоток от заземленных частей и других обмоток, и 2) продольную (или внутреннюю) изоляцию — между различными точками данной обмотки, т. е. между витками, слоями и катушками. Аналогично можно подразделить также и изоляцию отводов и переключателей [Л. 5].

При расчете изоляции отдельных частей трансформатора очень важными являются правильная оценка условий работы изоляции и рациональный выбор соответствующих изоляционных конструкций. Неправильный выбор изоляционных промежутков, материалов и размеров изоляционных конструкций может привести к разрушению трансформатора, если эти промежутки малы, или чрезмерному расходу изоляционных и других материалов и увеличению стоимости всего трансформатора, если эти промежутки велики. Для правильного выбора изоляционных конструкций, их материала, размеров, технологии изготовления, а также для правильного определения размеров изоляционных промежутков необходимо знать требования, которые предъявляются к изоляции трансформатора.

Условия работы изоляции в электропечном трансформаторе практически не отличаются от условий ее работы в нормальном силовом трансформаторе; в эксплуатации она подвергается тем же воздействиям и должна отвечать тем же требованиям, что и в нормальном силовом трансформаторе. Поэтому все общие положения, относящиеся к изо-

ляции нормальных силовых трансформаторов [Л. 3 и 4] могут быть полностью отнесены и к изоляции электропечных трансформаторов. Некоторые особенности изоляционных конструкций, связанные с применением чередующихся обмоток, не мешают применению в электропечных трансформаторах тех же конструктивных элементов (цилиндры, шайбы, прокладки и т. п.) и тех же изоляционных материалов, что и в нормальных силовых трансформаторах.

Изоляция трансформатора должна выдерживать без повреждений электрические, тепловые, механические и физико-химические воздействия, которым она подвергается при эксплуатации трансформатора. Ввиду того что эти воздействия чрезвычайно многообразны, расчет изоляции и проверка ее прочности в готовом трансформаторе для всех возможных случаев весьма затруднены. Поэтому в практике трансформаторостроения были выработаны определенные нормы и методы контрольных испытаний, соблюдение которых позволяет получить изоляцию, прочную во всех отношениях.

1. Требования электрической прочности. Для упрощения расчета и стандартизации требований, предъявляемых к электрической прочности изоляции готового трансформатора, электрический расчет изоляции производится так, чтобы она могла выдержать контрольные и типовые испытания, предусмотренные соответствующими нормами и установленные на основании тех воздействий, которым изоляция может подвергаться при эксплуатации трансформатора. Нормы испытаний составлены с учетом всех возможных в практике величин, длительности и характера электрических воздействий, содержат необходимые запасы прочности и закреплены в виде ГОСТ или ведомственных технических условий. Эти нормы периодически пересматриваются в соответствии с уточнением технических требований, предъявляемых к трансформаторам, и развитием их производства и являются строго обязательными для всех предприятий, выпускающих трансформаторы.

В отношении электрической прочности изоляция электропечных масляных трансформаторов должна отвечать требованиям ГОСТ 1546-42, которым установлены следующие контрольные испытания каждого выпускаемого из производства трансформатора:

а) Испытанию подвергается изоляция каждой из обмоток, электрически не связанной с другими обмотками. Испытательное напряжение прикладывается между испы-

тываемой обмоткой, замкнутой накоротко, и заземленным баком, с которым соединяются сердечник и замкнутые накоротко все прочие обмотки трансформатора. Длительность приложения испытательного напряжения 1 *мин*.

Испытательное напряжение (50 *гц*) прикладывается от постороннего источника. Испытательные напряжения при нормальных атмосферных условиях (температура +20° С, барометрическое давление 760 *мм рт. ст.*, влажность 11 *г/м*$^3$) должны быть не ниже значений, указанных в табл. 3-1.

Таблица 3-1

**Испытательные напряжения для масляных силовых трансформаторов**

| Класс изоляции, *кв* | 3 | 6 | 10 | 15 | 35 | 110 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Наибольшее рабочее напряжение, $кв_{действ}$ . . . . . . | 3,5 | 6,9 | 11,5 | 17,5 | 40,5 | 221 |
| Испытательное напряжение $U_{исп.\ кв}$ . . . . . . . . . . | 18 | 25 | 35 | 45 | 85 | 230 |

При этом испытании все части обмотки имеют одно и то же напряжение и проверяется главная изоляция обмотки, т. е. изоляция обмотки от сердечника, других обмоток и бака, а также изоляция отводов и переключателей от заземленных частей и отводов других обмоток.

б) После испытания напряжением, приложенным от другого источника, изоляция обмоток испытывается напряжением, наведенным в самом испытываемом трансформаторе в результате приложения к одной из обмоток (между ее вводами) двойного номинального напряжения повышенной частоты. Длительность приложения этого испытательного напряжения 1 *мин*.

При этом испытании проверяются продольная изоляция обмотки, т. е. изоляция между витками, слоями, катушками, а также между обмотками разных фаз и соответствующая изоляция отводов и переключателей.

Силовые трансформаторы, устанавливаемые на открытых подстанциях, подвергаются также типовым испытаниям при воздействии импульсных перенапряжений, имитирующих атмосферные разряды. Электропечные трансформаторы, устанавливаемые обычно внутри помещений и присоединяемые к сети высшего напряжения при посредстве

кабеля, менее подвержены воздействию атмосферных перенапряжений, поэтому их продольная изоляция при прочих равных условиях оказывается более прочной, чем изоляция нормальных силовых трансформаторов.

Помимо изоляции токоведущих частей, в трансформаторе испытывается также изоляция шпилек, стягивающих стержни и ярма. Эта изоляция проверяется кратковременным приложением напряжения 1 000 *в* между шпилькой и листами стали сердечника. Стяжные шпильки стержней испытываются до насадки обмоток.

Описанные испытания электрической прочности изоляции трансформатора при правильном уходе за ним гарантируют длительную надежную работу его в эксплуатации. В свою очередь эти требования электрической прочности изоляции обеспечиваются в трансформаторах правильным выбором изоляционных конструкций, размеров изоляционных промежутков и изоляционных материалов, электрическая прочность каждой партии которых также проверяется по специальным техническим условиям до применения их в производстве.

2. Требования нагревостойкости изоляции. Согласно ГОСТ 7204-54 температура воздуха, окружающего электропечной трансформатор, может достигать +35° С. Превышение температуры обмоток и масла трансформатора над воздухом обычно допускается соответственно не более 60 и 50° С. Таким образом, средняя температура обмоток такого трансформатора может достигать +95° С, а температура масла в верхних слоях +85° С. Максимальная температура в отдельных катушках обмоток будет выше +95° С. Частые короткие замыкания в цепи обмоток НН также могут дать некоторое дополнительное повышение температуры обмоток.

Необходимая нагревостойкость изоляции, гарантирующая длительную безаварийную работу трансформатора, достигается прежде всего правильным тепловым расчетом его обмоток и масляного бака, обеспечивающим получение температуры обмоток и масла в допускаемых пределах путем применения изоляционных материалов соответствующего класса, выдерживающих длительно воздействие допустимой температуры и рациональной конструкции обмоток и изоляционных деталей, обеспечивающих их нормальное охлаждение. Изоляционные материалы, обычно применяемые в масляных трансформаторах, допускают работу при температурах до 100—105° С, а также выдерживают

единичные кратковременные (до 4—5 *сек*) повышения температуры до 250° С при коротких замыканиях аварийного характера.

3. Требования механической прочности изоляции. При коротких замыканиях механические силы между обмотками трансформатора или их отдельными частями могут достигать величин, разрушающих обмотки и всю конструкцию трансформатора. В электропечных трансформаторах ток и механические силы при коротком замыкании ограничены, что в основном гарантирует соблюдение требований механической прочности обмоток. Частое повторение коротких замыканий в нормальном рабочем режиме, однако, создает опасность постепенного разрушения изоляции. Требование механической прочности изоляции обмоток в этом случае удовлетворяется рациональной конструкцией и расположением обмоток и выбором материалов, обеспечивающими наименьшие силы при наибольшей механической прочности обмоток. Практические указания по этому вопросу даны в гл. 5.

В обычно применяемых конструкциях трансформаторов изоляция подвергается воздействию только сжимающих сил, а наиболее употребительные изоляционные материалы, как, например, электроизоляционный картон, кабельная бумага, бумажно-бакелитовые изделия и др., допускают сжимающие напряжения до 200 *кГ/см*², что практически оказывается совершенно достаточным.

4. Требования прочности изоляции при физико-химических воздействиях. Изоляция трансформатора не должна разрушаться при длительном воздействии трансформаторного масла, нагретого до температуры 95—100° С. Практически это достигается применением изоляционных материалов, химически инертных по отношению к маслу. Материалы, нормально применяемые в масляных трансформаторах, как, например, электроизоляционный картон, разные сорта бумаги, фарфор, хлопчатобумажная лента, дерево некоторых пород (бук, береза), не вступают в химические взаимодействия с маслом, не разрушаются сами и не способствуют химическому разложению и загрязнению масла. Изоляционные материалы, содержащие в том или ином виде смолы, лак и эмали, например эмалевая изоляция провода, бакелитовые изделия, лакоткани и пр., должны содержать смолы, лаки и эмали, нерастворимые в трансформаторном масле. В производстве при поступлении каждой партии такого материала от не-

го отбирается проба, которая испытывается в горячем масле.

Не следует применять в масляных трансформаторах некоторые смолистые породы дерева — ель, сосну, лиственницу, а также дуб; совершенно недопустима натуральная резина, легко растворяющаяся в масле.

Трансформаторное масло, соприкасаясь в горячем состоянии с воздухом, в большей степени подвергается химическим воздействиям и увлажнению, чем твердая изоляция трансформатора. Расширитель, уменьшая поверхность (зеркало) соприкосновения масла с воздухом, способствует сохранению масла. Кроме того, в эксплуатации практикуются систематическая очистка, сушка и смена масла.

Помимо требований, предъявляемых к изоляции трансформатора условиями эксплуатации, при выборе изоляционных конструкций и материалов следует считаться также и с экономическими соображениями и условиями производства, отдавая предпочтение при соблюдении равной прочности более дешевым материалам, добиваясь экономии материалов, а также применения материалов, допускающих более простую и дешевую обработку.

## 3-2. ВЫБОР ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

В электрическом отношении изоляция трансформатора должна обеспечивать его токоведущие части — обмотки, отводы, переключатели и вводы — от пробоя на землю и между токоведущими частями как при рабочем напряжении, так и при возможных перенапряжениях.

Расчет изоляции на электрическую прочность производится таким образом, чтобы изоляция выдерживала нормированные испытательные напряжения при контрольных и типовых испытаниях трансформатора. Этот расчет для каждой токоведущей части обычно заключается в: 1) выявлении основных изоляционных промежутков между этой частью и заземленными деталями или другими токоведущими частями; 2) определении по нормам величин испытательных напряжений для этих промежутков; 3) выборе размеров этих промежутков и подборе изоляционных конструкций и материалов, обеспечивающих электрическую прочность при найденных испытательных напряжениях.

Расположение основных изоляционных промежутков определяется конструкцией трансформатора, взаимным расположением его обмоток, сердечника, бака и других

частей. Так, например, в стержневом трансформаторе современной конструкции с чередующимися обмотками основными промежутками являются: осевой канал между обмотками ВН и НН и стержнем, горизонтальные радиальные каналы между обмотками ВН и НН, пространства между крайней подгруппой обмотки и ярмом, между обмотками и стенкой бака и др. (рис. 3-1,*а*). Этим промежуткам соответствуют также и вполне определенные электрические воздействия при испытаниях трансформатора испытательным напряжением.

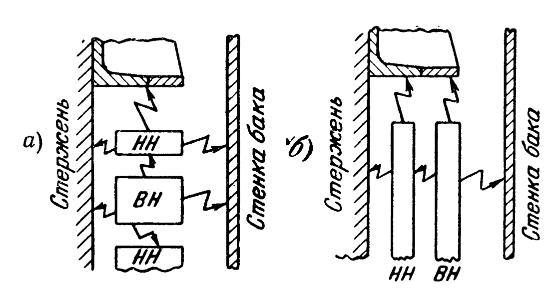



Рис. 3-1. Основные изоляционные промежутки главной изоляции.

*а* — чередующаяся обмотка; *б* —концентрическая обмотка.

Определение минимально допустимых размеров изоляционных промежутков тесно связано с теми изоляционными конструкциями, которыми будут заполняться эти промежутки. Каждая изоляционная конструкция в масле, как бы сложна она ни была, всегда состоит из различных комбинаций трех элементов:

а) чисто масляного промежутка;

б) барьера, т. е. перегородки из твердого изолирующего материала в масляном промежутке;

в) покрытия одного или обоих электродов твердым изолирующим веществом, плотно облегающим электрод и принимающим его форму.

Величины пробивных, а следовательно, и допустимых напряжений для промежутков, различным образом заполненных изоляционными деталями, различны, и задача заключается в выборе изоляционной конструкции, позволяющей получить минимальное расстояние между электродами при заданном испытательном напряжении. Правильный выбор изоляции усложняется тем обстоятельством, что пробивные и допустимые напряжения зависят не только от

размера промежутка и конструкции изоляции, но также и от конфигурации силовых линий электрического поля, т. е. от формы токоведущих и заземленных частей и их взаимного расположения.

Практические рекомендации этого параграфа по выбору изоляционных конструкций и минимально допустимых размеров промежутков даются для частного случая изоляции электропечного трансформатора с чередующимися обмотками и напряжением на стороне ВН не более 35 *кв*. В этих рекомендациях учтен необходимый запас прочности изоляции, представляющий собой отношение пробивного напряжения к испытательному и являющийся показателем большого или меньшего доверия к прочности и стабильности той или другой конструкции и качеству применяемых материалов. В рекомендациях учтены также и возможные допуски в отклонении действительных размеров токоведущих и заземленных частей от проектных. Эта поправка в явном или скрытом виде введена во всех таблицах.

## Изоляция обмоток

а) Главная изоляция обмоток трансформатора определяется в основном электрической прочностью при частоте 50 *гц* и соответствующими испытательными напряжениями, определяемыми по табл. 3-1. Главная изоляция чередующихся обмоток, т. е. их изоляция от заземленных частей (стержень, ярмо, стенка бака) и между обмотками ВН и НН при напряжении обмотки ВН не более 10 *кв* ($U_{исп} = 35$ *кв*), выполняется по рис. 3-2. Изоляция обеих обмоток от стержня осуществляется масляным каналом (размер $a_{01}$) с барьером в виде бумажно-бакелитового цилиндра *1*. Изоляция между обмотками ВН и НН выполнена в виде горизонтального масляного канала (размер $a_{12}$). В качестве барьера в канале установлены две электрокартонные шайбы *2* с общей толщиной $\delta_{12}$. Изоляция между обмотками двух соседних стержней осуществляется масляным каналом (наименьший размер — $a_{22}$) с барьером *5* — электрокартонной перегородкой толщиной $\delta_{22}$. Крайняя подгруппа обмоток изолируется от ярма также масляным каналом (размер $l_0$) с барьером в виде шайбы *4* толщиной $\delta_ш$.

Барьеры в масляных каналах (цилиндр, шайбы, перегородка) выполнены так, что их длина превышает длину соответствующего канала. Так, цилиндр и междуфазная

перегородка выступают за длину обмотки на $l_{\text{оц}}$ *см*, а шайбы — за ширину обмотки на $b$ *см*. Эти выступы удлиняют путь поверхностного разряда, обеспечивая надлежащую электрическую прочность (изоляцию) обмотки.

При такой конструкции главной изоляции минимальные размеры масляных каналов и барьеров в них могут быть определены по табл. 3-2. При этом изоляция обмоток от

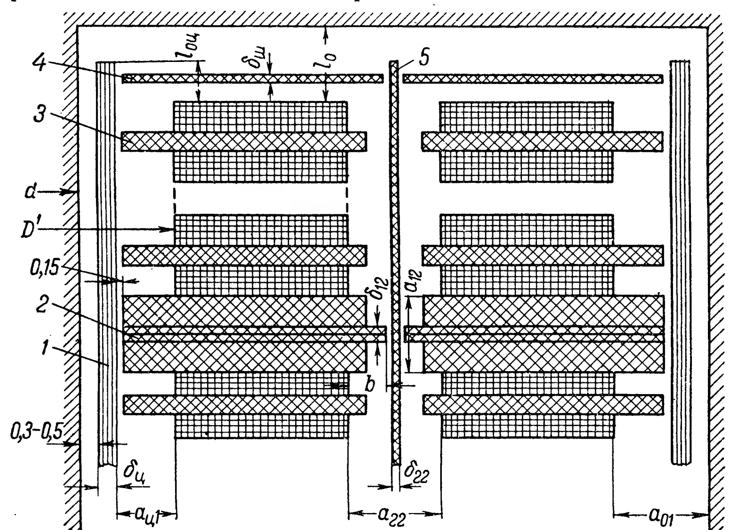



**Рис. 3-2.** Главная изоляция чередующихся обмоток до 10 *кв*.
*1* — бумажно-бакелитовый цилиндр; *2* и *4* — электрокартонные шайбы; *3* — междукатушечная прокладка (электрокартон); *5* — междуфазная перегородка (электрокартон). Размеры в сантиметрах.

стержня, между обмотками ВН и НН и между фазами определяется по испытательному напряжению обмотки ВН, а изоляция от ярма — по испытательному напряжению той из обмоток, которая непосредственно прилегает к ярму.

Некоторые размеры изоляционных конструкций зависят не только от испытательных напряжений, но и от мощности трансформатора и определяются условиями как электрической, так и механической прочности обмоток. Это учтено в табл. 3-2, где минимально допустимые размеры некоторых промежутков и деталей даны различными для трансформаторов различных мощностей.

При рабочем напряжении на обмотке ВН 35 *кв* ($U_{\text{исп}} = 85$ *кв*) применяется конструкция изоляции, показанная на рис. 3-3. Изоляция обмоток от стержня осуществляется

Таблица 3-2

**Главная изоляция чередующихся обмоток электропечных трансформаторов. Минимальные изоляционные расстояния с учетом конструктивных требований, *см***

| Мощность трансформатора $S$, *ква* | $U_{исп}$, *кв* | От стержня | | От ярма | | | Между ВН и НН | | | Между фазами | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $a_{ц1}$ | $\delta_ц$ | $l_0$ | $l_{0ц}$ | $\delta_щ$ | $a_{12}$ | $\delta_{12}$ | $b$ | $a_{22}$ | $\delta_{22}$ |
| До 1 000 | 5 | 1,4 | 0,3—0,4 | 1,9 | 1,0 | 0,0 | 1,6 | 0,3 | 0,8 | 2,0 | 0,3 |
| 1 000—10 000 | 5 | 1,4 | 0,5—0,6* | 2,3* | 1,0 | 0,0 | 1,6 | 0,3 | 0,8 | 2,0 | 0,3 |
| До 1 000 | 18 и 25 | 1,4 | 0,3—0,4 | 3,2 | 2,0 | 0,3 | 1,6 | 0,3 | 0,8 | 2,0 | 0,3 |
| 1 000—10 000 | 18 и 25 | 1,4 | 0,5—0,6* | 3,6* | 2,0 | 0,3 | 1,6 | 0,3 | 0,8 | 2,0 | 0,3 |
| До 1 000 | 35 | 1,7 | 0,4 | 4,2 | 3,0 | 0,3 | 2,0 | 0,4 | 1,0 | 2,4 | 0,3 |
| 1 000—10 000 | 35 | 1,7 | 0,5—0,6* | 4,6* | 3,0 | 0,3 | 2,0 | 0,4 | 1,0 | 2,4 | 0,3 |

Примечания:

1. Канал между обмоткой и стержнем: $a_{01} \approx a_{ц1} + \delta_ц + (0,3 \div 0,5)$.

2*. Для трансформаторов мощностью более 10 000 *ква* толщина цилиндра $\delta_ц$ увеличивается до 0,8 *см*, расстояние до ярма $l_0$ — до 4,0 *см*.

3. Для однофазных трансформаторов с последовательным соединением обмоток ВН двух стержней изоляция „между фазами" берется по таблице; при параллельном соединении ($a_{22}$=1,6 *см*) междуфазная перегородка не ставится ($\delta_{22}$=0).

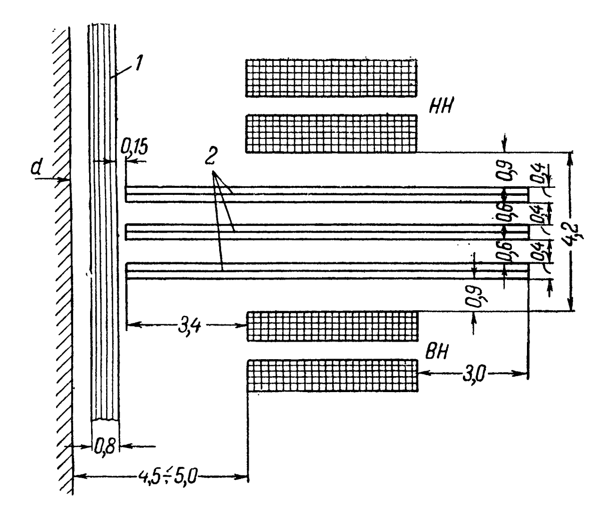



Рис. 3-3. Главная изоляция чередующихся обмоток на 35 *кв.*

*1* — бумажно-бакелитовый цилиндр; *2* — шайбы из электрокартона. Размеры в сантиметрах.

масляным каналом с бумажно-бакелитовым цилиндром *1* толщиной 0,8 *см*. В радиальном канале между обмотками ВН и НН установлены три двойные шайбы из электрокартона *2*. Каждая из них составлена из двух шайб толщиной по 0,2 *см*. Между обмотками ВН соседних фаз масляный канал $a_{22} = 7{,}0$ *см*; междуфазная перегородка из электрокартона имеет толщину 0,3 *см*. Все остальные размеры — по рис. 3-3. Междукатушечные прокладки на рис. 3-3 не показаны.

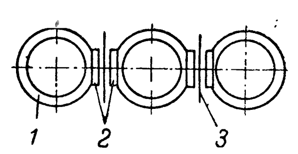



Рис. 3-4. Срез шайб и установка угловых перегородок в междуфазном промежутке.

*1* — шайба; *2* — угловая перегородка; *3* — междуфазная перегородка.

Расстояние между обмотками ВН соседних фаз $a_{22}=7{,}0$ *см* определяется в основном необходимым выступом шайб в канале между обмотками ВН и НН за внешний габарит обмотки. Если в месте сближения обмоток двух соседних фаз (рис. 3-4) сделать срез на междуобмоточных шайбах 1 (рис. 3-5) и поставить угловые перегородки из электрокартона *2* толщиной 0,2 *см* и междуфазную перегородку *3* толщиной 0,3 *см*, то расстояние $a_{22}$ можно принять равным 4,0 *см*.

Концентрические обмотки очень редко применяются в электропечных трансформаторах. Относительно их главной изоляции см. [Л. 3].

б) Продольная изоляция обмоток. Продольной изоляцией обмоток принято называть изоляцию между элементами одной и той же обмотки, т. е. между ее витками, слоями витков и катушками. Изоляция этих элементов в зависимости от их расположения в обмотке может в большей или меньшей степени подвергаться воздействию напряжения с частотой 50 *гц* или импульсов. Те и другие воздей-

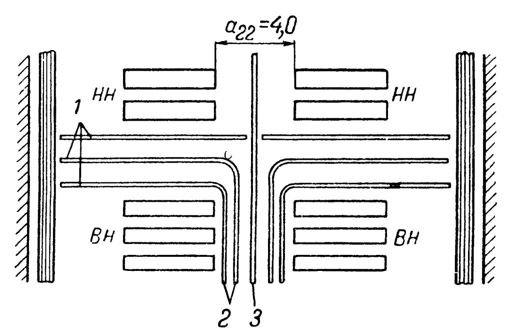



Рис. 3-5. Установка угловых перегородок в междуфазном пространстве.

*1* — шайба; *2* — угловая перегородка; *3* — междуфазная перегородка.

ствия существенно различаются, и выбор изоляции—ее характера, материала и размеров — для каждого элемента должен осуществляться в соответствии с наиболее тяжелым из возможных воздействий. По этому принципу с учетом нормальной работы изоляции при частоте 50 *гц* и импульсах составлены рекомендации настоящего параграфа. Поскольку, однако, каждому рабочему напряжению соответствуют вполне определенные испытательные напряжения при 50 *гц* и импульсах, все рекомендации даны применительно к рабочему или испытательному напряжению при 50 *гц*.

Изоляция между витками основной части обмоток обычно обеспечивается собственной изоляцией обмоточной меди, и никакой дополнительной изоляции витков не требуется. В масляных электропечных трансформаторах применяется обмоточный провод с изоляцией двух марок: ПБ — провод, изолированный кабельной бумагой, только круглый, диаметром 1,25—3,53 *мм*; ПББО — провод, изо-

лированный кабельной бумагой с хлопчатобумажной оплеткой вразгон, только прямоугольного сечения, с размерами 1,35×4,4—5,1×12,5 *мм*. В электропечных трансформаторах на стороне НН часто применяется винтовая обмотка, все витки которой разделены масляными каналами. Они служат в основном для улучшения охлаждения обмотки, но могут быть использованы также в качестве междувитковой изоляции, и обмотка в этом случае может быть намотана из неизолированного медного провода.

Выбор изоляции провода может быть сделан по табл. 3-3. Для обмоток ВН с рабочим напряжением 35 *кв* ($U_{исп}=85$ *кв*) рекомендация по выбору изоляции 0,95 *мм* дана с учетом импульсной прочности.

Таблица 3-3

**Выбор витковой изоляции**

| Обмотка | Марка провода | Толщина изоляции на две стороны, *мм* |
|---|---|---|
| НН | ПББО прямоугольный | 0,45 (0,50—0,55) |
| | прямоугольный | Без изоляции |
| ВН $U_{исп}\leq 35$ *кв* | ПБ круглый | 0,30 (0,40) |
| | ПББО прямоугольный | 0,45 (0,50—0,55) |
| ВН $U_{исп}=85$ *кв* | ПББО прямоугольный | 0,95 (1,0) |

Примечание. Толщина изоляции указана номинальная, в скобках указаны расчетные размеры с учетом допусков.

Междуслойная изоляция в обмотках НН и ВН электропечных трансформаторов, намотанных из прямоугольного провода, не применяется. Для обмоток ВН иногда применяется многослойная цилиндрическая катушечная обмотка, намотанная из круглого провода. В этом случае междуслойная изоляция может быть выполнена по табл. 3-4.

Междукатушечная изоляция в электропечных трансформаторах, как правило, выполняется в виде горизонтальных масляных каналов (рис. 3-6,*а*) и в редких случаях в виде электрокартонных шайб (рис. 3-6,*б*). Эта изоляция должна обеспечивать обмотку от разряда по поверхности реек или

Таблица 3-4

**Нормальная междуслойная изоляция в многослойных цилиндрических катушечных обмотках**

| Рабочее напряжение двух слоев обмотки, *в* | Толщина изоляции, *мм* | Материал изоляции |
|---|---|---|
| До 150 | 2×0,06 | Телефонная бумага |
| 151—200 | 1×0,2 | Кабельная бумага или электроизоляционный картон |
| 201—300 | 2×0,2 или 1×0,5 | Кабельная бумага или электроизоляционный картон |

прокладок между катушками. Минимальный осевой размер масляного канала может быть найден по формуле

$$h_к \approx 0{,}3 \frac{2U_к}{1\,000} [см], \qquad (3\text{-}1)$$

где $U_к$ — рабочее напряжение одной катушки, *в*.

Найденный размер канала обычно округляют в пределах 0,05 *см* и проверяют по условиям отвода тепла от обмотки. Из соображений нормального охлаждения обмотки размер $h_к$ следует выбирать не меньше 0,1 $l_р$, где $l_р$ — радиальный размер (ширина) обмотки, и во всяком случае не меньше 0,4 *см*.

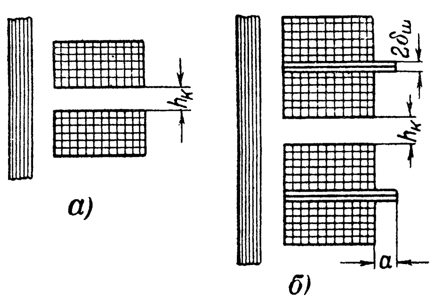



Рис. 3-6. Междукатушечная изоляция.
*а* — масляный канал; *б* — электрокартонные шайбы.

В случае применения шайб (рис. 3-6,*б*) между каждыми двумя соседними катушками укладываются две шайбы толщиной $\delta_ш = 0{,}05$ *см*; $a \geqslant 0{,}6$ *см*.

в) Изоляция отводов и переключателей. Отводы, т. е. проводники, соединяющие обмотки трансформатора между собой, с проходными изоляторами на крышке (вводами) и переключателями, а также переключатели, обычно располагаются в масле в пространстве между обмоткой и стенкой бака или между ярмом и крышкой бака. Отводы и переключатели каждой обмотки должны быть надежно изолированы от бака, заземленных частей, крепящих сердечник (прессующие балки ярма, заземленные болты и т. п.),

а также от всех токоведущих частей, т. е. обмоток и других отводов. Этот вопрос обычно решается при выполнении конструкции отводов [Л. 4].

При расчете трансформатора размеры изоляционных промежутков для отводов определяются только в пространстве между обмоткой и баком, так как от этих расстояний зависят размеры бака. Соответствующие минимальные расстояния ориентировочно могут быть определены по табл. 3-5 (рис. 3-7,*а*).

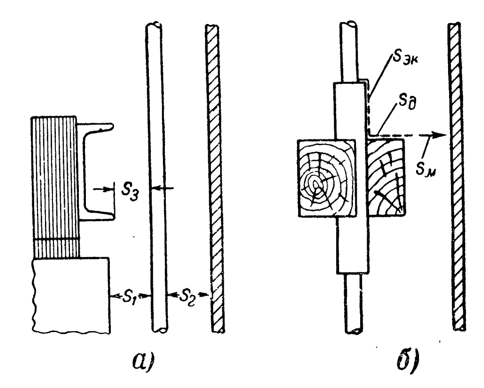



Рис. 3-7. Отвод между обмоткой и стенкой бака.

Табл. 3-5 дает расстояния от отвода до стенки бака, прессующей балки ярма и собственной обмотки, т. е. обмотки, от которой идет отвод, при известном испытательном напряжении отвода обмотки. Этой таблицей можно пользоваться также и в случае определения минимального расстояния от отвода до обмотки, имеющей большее испытательное напряжение, чем отвод. В этом случае расстояние определяется по большему из двух испытательных напряжений.

В табл. 3-5 минимально допустимый масляный промежуток $s$ определяется как сумма минимального изоляционного промежутка $S_и$ и суммарного допуска при изготовлении соответствующих деталей трансформатора $S_к$. Найденный промежуток $s$ следует понимать как чисто масляный промежуток в свету между изоляцией отвода и соответствующей деталью или ее изоляцией. В том случае, если часть изоляционного промежутка заполнена изоляционными деталями (рис. 3-7,*б*), по поверхности которых может пройти путь разряда, эквивалентный чисто масляный промежуток определяется по формуле

$$s = s_м + 0{,}4s_д + 0{,}67s_{эк} \ [см], \qquad (3\text{-}2)$$

где $s_м$ — действительный чисто масляный промежуток, *см*;

$s_д$ — длина пути разряда по поверхности дерева, *см*;

$s_{эк}$ — длина пути разряда по поверхности электроизоляционного картона, лакоткани, кабельной бумаги, бумажно-бакелитовых изделий, гетинакса, *см*.

Таблица 3-5

**Минимально допустимые изоляционные расстояния от отводов до заземленных частей,** *см*

| $U_{исп}$, *кв* | Толщина изоляции на одну сторону, *см* | Диаметр провода отвода, *см* | Расстояние до гладкой стенки бака или обмотки | | | Расстояние до прессующей балки, ярма, *см* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $s_и$ | $s_к$ | $s$ | $s_и$ | $s_к$ | $s$ |
| До 25 | 0 | <0,6 | 1,5 | 1,0 | 2,5 | 1,5 | 0,5 | 2,0 |
| | 0 | >0,6 | 1,2 | 1,0 | 2,2 | 1,2 | 0,5 | 1,7 |
| | 0,05 | — | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 1,0 | 0,5 | 1,5 |
| | 0,2 | — | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 1,0 | 0,5 | 1,5 |
| 35 | 0 | <0,6 | 3,2 | 1,0 | 4,2 | 2,5 | 0,5 | 3,0 |
| | 0 | >0,6 | 2,5 | 1,0 | 3,5 | 2,0 | 0,5 | 2,5 |
| | 0,05 | — | 1,5 | 1,0 | 2,5 | 1,5 | 0,5 | 2,0 |
| | 0,2 | — | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 1,2 | 0,5 | 1,7 |
| 85 | 0 | — | 8,0 | 1,0 | 9,0 | — | — | — |
| | 0,2 | — | 4,0 | 1,0 | 5,0 | — | — | — |
| | 0,4 | — | 3,0 | 1,0 | 4,0 | 3,7 | 0,5 | 4,2 |
| | 0,6 | — | 2,5 | 1,0 | 3,5 | 3,5 | 0,5 | 4,0 |

На рис. 3-7,*б* отвод укреплен в деревянных деталях. Для усиления изоляции в месте крепления отвода он заключен в бумажно-бакелитовую трубку. Разряд может пройти по поверхности трубки ($s_{эк}$), затем по поверхности деревянной планки ($s_д$) и через масляный промежуток ($s_м$).

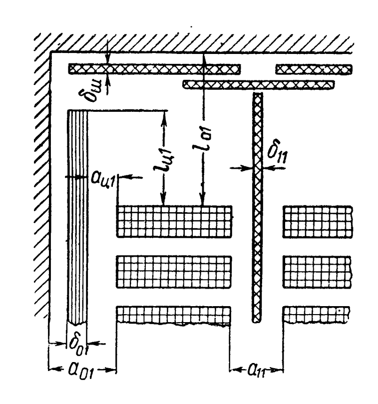


Рис. 3-8. Главная изоляция обмоток реактора.

$s$, найденное по формуле (3-2) для действительной конструкции, должно быть не меньше, чем определенное по табл. 3-5.

Токоограничивающий реактор, входящий в состав электропечного трансформаторного агрегата, имеет только одну обмотку, которая должна быть изолирована от стер-

жня, ярма и такой же обмотки соседней фазы. Изоляция обмоток этих реакторов испытывается теми же методами, что и изоляция обмоток трансформаторов. Испытательное напряжение для обмотки реактора принимается таким же, как и для обмотки трансформатора (обычно ВН), последовательно с которой включен реактор.

Таблица 3-6

**Главная изоляция обмоток реакторов. Минимальные изоляционные расстояния, *см***

| $U_{исп}$, *кв* | От ярма | | От стержня | | | | Между обмотками | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $l_{01}$ | $\delta_ш$ | $a_{01}$ | $\delta_{01}$ | $a_{ц1}$ | $l_{ц1}$ | $a_{11}$ | $\delta_{11}$ |
| 18 и 25 | 3,0 | — | 1,5 | 0,4 | 0,6 | 1,8 | 1,0 | 0,2 |
| 35 | 4,0 | — | 1,8 | 0,5 | 0,8 | 2,5 | 1,4 | 0,2 |
| 85 | 9,0 | 0,2 | 3,0 | 0,6 | 1,9 | 7,0 | 3,0 | 0,3 |

Главная изоляция обмотки реактора показана на рис. 3-8. Изоляция обмотки от стержня осуществляется масляным каналом $a_{01}$ и бумажно-бакелитовым цилиндром толщиной $\delta_{01}$, от ярма — масляным промежутком $l_{01}$ и при $U_{исп} = 85$ *кв* — шайбой, от обмотки соседней фазы — каналом $a_{11}$ и электрокартонной перегородкой толщиной $\delta_{11}$.

Размеры изоляционных промежутков и деталей можно принять по табл. 3-6.

## *ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ*

# ВЫБОР КОНСТРУКЦИЙ И РАСЧЕТ ОБМОТОК

## 4-1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОБМОТКАМ ТРАНСФОРМАТОРА

Общие требования, предъявляемые к обмоткам трансформатора, можно подразделить на эксплуатационные и производственные. Основными эксплуатационными требованиями являются электрическая и механическая прочность и нагревостойкость как обмоток, так и других частей и всего трансформатора в целом. Изоляция обмоток и других частей трансформатора должна выдерживать без повреждений как длительное воздействие рабочего напряжения, так и те кратковременные коммутационные и атмосферные

перенапряжения, которые могут возникать в сети, где трансформатор будет работать. Механическая прочность обмоток должна гарантировать их от механических деформаций и повреждений при коротких замыканиях, сопровождающихся токами, значительно превышающими номинальный рабочий ток трансформатора. Повышенная температура, возникающая в обмотках и других частях трансформатора при нормальной работе и коротких замыканиях ограниченной длительности, не должна приводить к быстрому тепловому разрушению изоляции обмоток и других частей, а также к разрушению масла трансформатора.

Общие эксплуатационные требования, предъявляемые к электропечным трансформаторам и их обмоткам, регламентированы общесоюзными стандартами на трансформаторы для дуговых сталеплавильных печей (ГОСТ 7207-54), частично — на трансформаторы силовые масляные (ГОСТ-401-41) и испытания электрической прочности изоляции трансформаторов (ГОСТ 1516-42), а также специальными техническими условиями. Практически электрическая прочность изоляции обмоток достигается рациональной ее конструкцией, правильным выбором размеров изоляционных промежутков и изоляционных материалов. Рекомендации по этому вопросу даны в гл. 3. Требование механической прочности обмотки удовлетворяется путем рационального выбора типа и конструкции обмотки и расположения ее витков и катушек таким образом, чтобы возникающие в этой обмотке механические силы были по возможности меньшими, а механическая устойчивость обмотки — возможно большей. Для достижения необходимой нагревостойкости следует обеспечить свободную теплоотдачу в масло всего тепла, выделяющегося в обмотках, т. е. достаточно большую поверхность соприкосновения обмотки с охлаждающим маслом и свободный доступ масла во все каналы обмотки.

Общие производственные требования сводятся к построению трансформатора с наименьшей затратой материалов и труда и наиболее простого по конструкции, т. е. к построению наиболее дешевого трансформатора, разумеется при соблюдении всех эксплуатационных требований. Эти производственные требования, предъявляемые к трансформатору в целом, в полной мере относятся и к обмоткам. Задачей проектировщика является разумное сочетание интересов эксплуатации и производства. Эта задача решается в значительной мере уже при выборе того или иного типа

обмотки. Поэтому на выбор типа обмотки, наиболее отвечающей требованиям эксплуатации и в то же время наиболее простой и дешевой в производстве, следует обращать особое внимание. Практические указания по этому вопросу даются ниже в характеристиках различных типов обмоток.

В процессе расчета обмотки после определения ее основных размеров и выбора типа следует добиваться наибольшей компактности в ее размещении, распределении витков и катушек, с тем чтобы получить наилучшее заполнение окна трансформатора. Одновременно следует стремиться к получению возможно более развитой поверхности охлаждения обмотки и обеспечению достаточных размеров масляных охлаждающих каналов.

## 4-2. ОБЩИЕ ДАННЫЕ ПО КОНСТРУКЦИИ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ДЕТАЛИ ОБМОТОК

Основным элементом всех обмоток трансформаторов является виток. В зависимости от величины тока нагрузки и поперечного сечения виток обмотки электропечного трансформатора может быть выполнен одним проводом круглого сечения или одним проводом прямоугольного сечения, или, наконец, при достаточно больших токах — группой па-

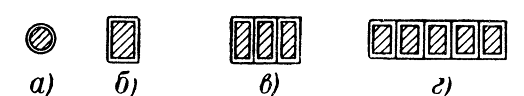



Рис. 4-1. Разные формы сечения витка обмотки электропечного трансформатора при различных размерах поперечного сечения и различном количестве параллельных проводов.

раллельных проводов прямоугольного сечения. На рис. 4-1 представлены различные варианты поперечных сечений витка обмотки электропечного трансформатора. Эти варианты, разумеется, не является исчерпывающими.

Ряд витков, намотанных на цилиндрической поверхности, называется слоем. В некоторых типах обмоток слой может состоять из нескольких десятков витков, в других— из нескольких или даже из одного витка.

Отдельные витки обмотки группируются в катушки. Катушкой называется группа последовательно соединенных витков обмотки, конструктивно объединенная и отделенная от других таких же групп или других обмоток трансформа-

тора. Каждая обмотка может состоять из одной, двух или многих катушек. Катушка может состоять из ряда слоев или только из одного слоя витков. Число витков в катушке может быть различным, как целым, так и дробным, однако оно должно быть больше единицы. На рис. 4-2 представлены поперечные сечения нескольких различных типов катушек.

Во всех типах обмоток принято различать осевое и радиальное направления. Осевым считается направление, параллельное оси стержня трансформатора, на который насаживается данная обмотка. Радиальным считается направление любого радиуса окружности обмотки. В стержневых электропечных трансформаторах с вертикальными стержнями осевое направление совпадает с вертикальным, а радиальное — с горизонтальным. В этом смысле принято говорить также об осевых и радиальных масляных каналах в обмотках.

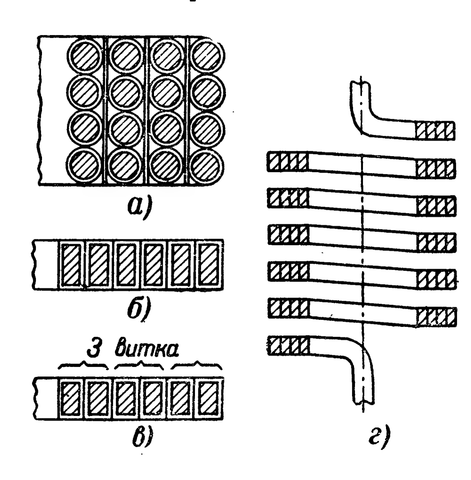
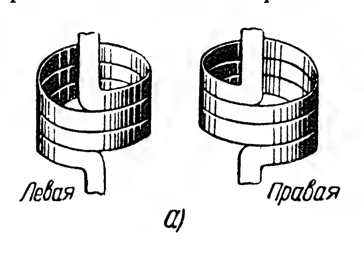



Рис. 4-2. Различные типы катушек.

*а* — катушка из 16 витков; *б* — катушка из шести витков; *в* — катушка из трех витков (два параллельных провода); *г* — катушка из шести витков (четыре параллельных провода).

По направлению намотки подобно резьбе винта различают обмотки правые и левые (рис. 4-3). Отдельные одинарные катушки, имеющие форму плоской спирали, могут условно считаться правыми или левыми в зависимости от того, какой конец — внутренний или наружный—считать входным. Обычно такие катушки применяются только парами (двойная катушка). При этом входным и выходным являются наружные концы, а переход из катушки в катушку производится внутри катушек (рис. 4-3,*б*). Обмотка, составленная из любого числа последовательно соединенных двойных катушек одинаковой намотки, будет иметь то же направление, что и отдельные двойные катушки. Если по технологическим соображениям обмотка составляется из отдельно наматываемых одинарных катушек, то одного

указания, «правая» или «левая» обмотка, недостаточно. В этом случае во избежание ошибок указания по направлению намотки лучше всего давать в виде эскиза. Правильный выбор направления намотки имеет существенное значение для получения заданной группы соединений обмоток, а в однофазных трансформаторах — также и для правильного соединения частей обмоток, расположенных на разных стержнях. Большинство обмоток трансформаторов обычно выполняется левой намоткой.



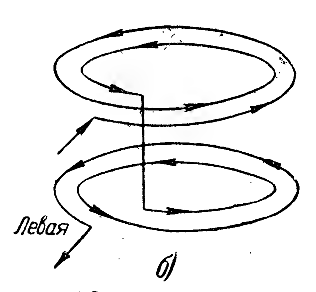




Рис. 4-3. Обмотки правой и левой намотки.

В качестве витковой изоляции в обмотках электропечных масляных трансформаторов используется собственная изоляция обмоточного провода. В этих трансформаторах обычно применяется прямоугольный провод марки ПББО, изолированный несколькими слоями кабельной бумаги, с несплошной обмоткой из хлопчатобумажной пряжи. Общая толщина изоляции 0,45×(0,5÷0,55) * *мм* на две стороны. Кроме того, провод любого размера может быть изготовлен с изоляцией большей толщины: 0,95 (1,00); 1,35 (1,40) или 1,95 (2,00) *мм*, а некоторые размеры — с изоляцией 2,95 (3,00); 4,4 (4,5) или 5,8 (6,0) *мм*. Сечение одного провода — в пределах 5,72 — 62,9 *мм*². Сравнительно редко, только в трансформаторах мощностью менее 1 000 *ква*, может найти применение круглый провод марки ПБ, изолированный несколькими слоями кабельной бумаги с толщиной изоляции на две стороны 0,30 (0,40) *мм* с сечением провода 1,25 — 9,79 *мм*². Некоторые размеры круглого провода могут иметь усиленную изоляцию: 0,80 (0,90) или 1,20 (1,35) *мм* на две стороны.

Сортамент медного провода, применяемого для трансформаторов, приведен в табл. 4-1. В целях упрощения но-

* Здесь и далее вне скобок дана номинальная толщина изоляции, в скобках — толщина изоляции для расчета размеров катушек с учетом неплотности укладки провода.

Таблица 4-1а

## Размеры и сечения прямоугольного медного провода, применяемого в масляных трансформаторах (марка ПББО)

| b \ a | 1,35 | 1,56 | 1,68 | 1,81 | 2,1 | 2,26 | 2,44 | 2,63 | 2,83 | 3,05 | 3,28 | 3,53 | 3,8 | 4,4 | 4,7 | 5,1 | 5,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3,8 | — | 5,72 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 4,4 | 5,73 | 6,65 | — | 7,75 | 8,76 | — | 10,2 | — | 12,0 | — | 13,9 | — | 15,1 | — | — | — | — |
| 5,1 | 6,68 | 7,75 | 8,36 | 9,02 | 10,2 | — | 11,9 | — | 13,9 | — | 16,2 | — | 18,9 | 21,5 | — | — | — |
| 5,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | 15,1 | — | — | — | 20,4 | — | — | — | — |
| 5,9 | 7,76 | 8,99 | 9,7 | 10,5 | 11,9 | — | 13,9 | — | 16,2 | — | 18,9 | — | 21,9 | — | — | 29,2 | — |
| 6,4 | — | 9,77 | — | 11,4 | 12,9 | — | 15,1 | — | 17,6 | 19,0 | 20,5 | — | 23,8 | 27,3 | — | 31,7 | — |
| 6,9 | — | 10,6 | 11,4 | 12,3 | 14,0 | — | 16,3 | — | 19,0 | — | 22,1 | — | 25,7 | 29,5 | — | 34,3 | — |
| 7,4 | — | — | — | — | — | — | — | — | 20,4 | 22,1 | — | — | — | | — | — | — |
| 8,0 | — | 12,3 | 13,2 | 14,4 | 16,3 | 17,6 | 19,0 | 20,5 | 22,1 | 23,9 | 25,7 | — | 29,9 | 34,3 | — | 39,9 | 43,1 |
| 8,6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 39,5 | — | — |
| 9,3 | — | \|14,3\| | — | 16,6 | 19,0 | — | 22,2 | 24,0 | \|25,8\| | 27,9 | 30,0 | — | \|34,8\| | 40,0 | — | 46,5 | — |
| 10,0 | — | — | — | — | — | — | 23,9 | 25,8 | — | — | 32,3 | — | 37,5 | 43,1 | — | 50,1 | 54,1 |
| 10,8 | — | — | — | 19,3 | 22,2 | — | 25,9 | — | 30,1 | — | 34,9 | 37,6 | 40,5 | 46,6 | — | 54,2 | 58,5 |
| 11,6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | — | — | 43,6 | — | — | 58,3 | — |
| 12,5 | — | — | — | — | \|25,8\| | — | 30,0 | — | \|34,9\| | 37,6 | 40,5 | 43,6 | \|47,0\| | — | — | \|62,9\| | — |

| Толщина изоляции на две стороны, *мм* | a = 1,35 … 3,8 | a = 4,4 … 5,5 |
|---|---|---|
| | Нормальная—0,45 (0,5)—все размеры | 0,45(0,55)—все размеры |
| | Усиленная—0,95 (1,0); 1,35 (1,4) и 1,95 (2,00)—все размеры | |
| | Усиленная—2,95 (3,0); 4,4 (4,5); 5,8 (6,0)—только для провода в рамке | |

Примечания: 1. В расчетной записке приводится номинальный размер изоляции, указанный без скобок.

2. Размеры витка (катушки) рассчитывают по толщине изоляции, указанной в скобках.

3. Все размеры даны в *мм*, сечения—в *мм*²

4. Провод изолирован кабельной бумагой с несплошной обмоткой хлопчатобумажной пряжей.

Увеличение веса медного прямоугольного провода за счет изоляции (для заказа).

| Размеры провода, *мм* | % увеличения веса |
|---|---|
| До 1,35×5,9 | 5 |
| 1,56×3,8—2,1×12,5 | 4 |
| 2,26×8,0—5,5×12,5 | 3 |

Таблица 4-16

**Размеры и сечения круглого медного провода, применяемого в масляных трансформаторах (марка ПБ)**

| ⌀ | П | Изоляция | ⌀ | П | Изоляция | ⌀ | П | Изоляция |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,25 | 1,23 | | 1,74 | 2,38 | | 2,63 | 5,43 | |
| 1,30 | 1,33 | | 1,81 | 2,57 | | 2,83 | 6,29 | |
| 1,35 | 1,43 | | 1,88 | 2,78 | | 3,05 | 7,31 | 0,30 (0,40) |
| 1,45 | 1,65 | 0,30 (0,40) | 1,95 | 2,99 | 0,30 (0,40) | 3,28 | 8,45 | |
| 1,50 | 1,77 | | 2,10 | 3,46 | | 3,53 | 9,79 | |
| 1,56 | 1,91 | | 2,26 | 4,01 | | | | |
| 1,68 | 2,22 | | 2,44 | 4,68 | | | | |

**Увеличение веса медного круглого провода за счет изоляции (для заказа)**

| Диаметр провода ⌀, *мм* | % увеличения веса |
|---|---|
| 1,25—1,81 | 4 |
| 1,88—2,63 | 3 |
| 2,83—4,1 | 2 |

Примечания: 1. Нормальная изоляция: провод изолирован кабельной бумагой, толщина изоляции номинальная —0,30 *мм* на две стороны; при расчете принимают 0,40 *мм* для учета неплотности укладки провода в катушке.

2. Усиленная изоляция: провод в рамке |____| может иметь по заказу изоляцию с номинальной толщиной 0,80 и 1,20 *мм* и расчетной —0,95 и 1,35 *мм* на две стороны.

менклатуры проводов, изготавливаемых для трансформаторов кабельными заводами, сортамент ограничен и содержит не все размеры, включенные в ГОСТ и каталоги.

Между витками, состоящими из нескольких параллельных проводов, в некоторых типах обмоток, например в винтовых обмотках НН электропечного трансформатора, могут быть сделаны радиальные каналы (рис. 4-4) для обеспечения свободного доступа масла и надлежащего охлаждения всех параллельных проводов витка. Эти каналы обеспечивают также и надежную, с большим запасом, изоляцию между витками.

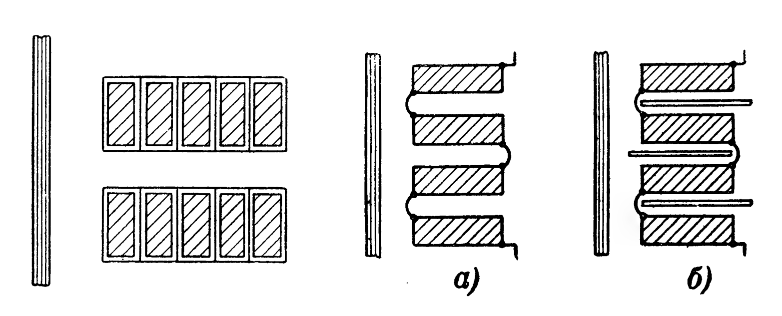



Рис. 4-4. Радиальный охлаждающий и изоляционный канал между двумя витками.

Рис. 4-5. Междукатушечная изоляция.

При разделении обмотки на катушки возникает необходимость в надлежащей междукатушечной изоляции. Эта изоляция, как видно из рис. 4-5, требуется то у наружного, то у внутреннего края катушки и в электропечных трансформаторах обычно выполняется в виде радиальных масляных каналов, служащих одновременно и для лучшего охлаждения обмотки (рис. 4-5,*а*). В редких случаях применяется барьерная изоляция в виде шайб из электроизоляционного картона (рис. 4-5,*б*).

Для образования осевого канала между обмоткой и изоляционным цилиндром обычно применяются рейки, склеенные бакелитовым или другим лаком из полос электроизоляционного картона. При намотке рейки укладываются по образующим цилиндра и плотно прижимаются проводом к цилиндру. Толщина рейки при этом определяет ширину (радиальный размер) осевого канала (рис. 4-6,*а*).

Радиальные (горизонтальные) каналы между катушками или между витками в обмотках с большим числом параллельных проводов обычно образуются междукатушечными прокладками, выштампованными из электроизоляционного картона. Каждая междукатушечная или междувитковая прокладка набирается из нескольких полосок толщиной 0,5—3,0 *мм* до нужной толщины, соответствующей осевому размеру (высоте) радиального канала. Для того чтобы связать рейки с междукатушечными прокладками, в картонных прокладках проштамповываются просечки по рис. 4-6,б. Этими просечками междукатушечные проклад-

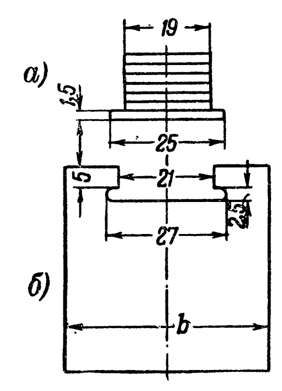



Рис. 4-6. Форма поперечного сечения реек (*а*) и форма междукатушечных прокладок (*б*).

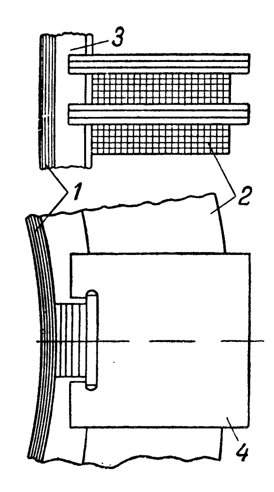



Рис. 4-7. Расположение реек и междукатушечных прокладок.

1 — цилиндр; 2 — катушка; 3 — рейка; 4 — междукатушечная прокладка.

ки надеваются на крайнюю широкую полоску рейки (рис. 4-7) при намотке или сборке обмотки на сердечнике.

В электропечных трансформаторах с чередующейся обмоткой и изоляцией между обмотками ВН и НН в виде масляного канала с шайбами (см. рис. 3-2) нельзя применять одну сквозную рейку на всю высоту обмотки, так как в этом случае рейка должна была бы проходить сквозь шайбы и тем самым лишать их свойств изоляционного барьера в масле. В такой обмотке рейка должна быть разрезана на части, примерно равные по длине расстоянию между двумя шайбами. Поскольку такое ограничение длины реек затрудняет их применение, а также потому, что

намотка чередующихся обмоток ВН и НН на одном жестком цилиндре достаточно сложна, обмотки электропечных трансформаторов чаще всего наматываются отдельными подгруппами ВН и НН и затем собираются на общем цилиндре с образованием осевых и радиальных каналов при помощи замковых междукатушечных прокладок без реек.

Одна из конструкций замковой прокладки изображена на рис. 4-8. Осевой канал в этом случае образуется специальными прокладками со сквозной просечкой (деталь *1* на рис. 4-8). Эти прокладки (*1*) и прокладки, образующие междукатушечные радиальные каналы (*2*), прошиваются полоской картона (*3*), отгибаемой в междукатушечный канал. Такие замковые прокладки могут применяться как в обмотках, наматываемых на станке сразу на весь стержень, так и в обмотках, наматываемых отдельными дисками и затем собираемых на сердечнике.

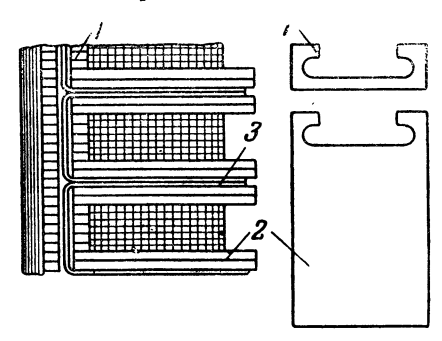


Рис. 4-8. Обмотка с замковыми прокладками без реек.

Ввиду того что стандартные толщины листов электроизоляционного картона кратны 0,5 *мм*, расчетные толщины прокладок (и размеры каналов) должны быть также кратны 0,5 *мм*. Это соображение относится также и к рейкам, склеенным из полосок картона.

После насадки обмоток на сердечник собранные трансформаторы обычно подвергаются сушке под вакуумом при температуре около 100° С. В результате сушки междукатушечные прокладки и шайбы дают усадку по толщине, достигающую 4—6% и более. Поэтому при расчете всех типов обмоток, имеющих радиальные каналы или шайбы, следует учитывать, что действительный суммарный осевой размер междукатушечной (междувитковой) изоляции после сушки и опрессовки обмоток будет меньше расчетного размера на величину усадки.

Число реек (прокладок) по окружности обмотки для трансформаторов мощностью до 560 *ква* выбирают обычно

исходя из условий удобства намотки, для более мощных трансформаторов — из условий механической прочности. Для ориентировки при выборе числа реек могут служить следующие данные:

| Мощность трансформатора | Число реек |
|---|---|
| До 100 *ква* | 6 |
| 100—560 *ква* | 8 |
| 750—1 350 *ква* | 8—10 |
| 1 500—5 600 *ква* | 10—12 |

В трансформаторах 7 500 *ква* и выше число реек должно быть таким, чтобы расстояние между их осями по среднему витку катушки было равно 15—18 *см*. Ширина прокладки $b$ обычно принимается равной 3,5—5,0 *см*.

## 4-3. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОПЕЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В электропечных трансформаторах благодаря специфическим условиям их работы нашло применение лишь ограниченное число типов обмоток, обычно применяемых для трансформаторов. Наиболее часто применяются обмотки:

а) винтовые;

б) спиральные катушечные непрерывной намотки и отдельными дисками;

в) многослойные цилиндрические катушечные из круглого провода.

Простой винтовой параллельной обмоткой называется обмотка, витки которой следуют один за другим в осевом направлении по винтовой линии аналогично виткам резьбы одноходового винта, с радиальными охлаждающими каналами между каждыми двумя соседними витками, а сечение каждого витка составлено из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения, расположенных в радиальном направлении один относительно другого (рис. 4-9).

В отдельных случаях для экономии места по высоте радиальные охлаждающие каналы в винтовой обмотке могут быть сделаны через виток.

Винтовая параллельная обмотка выполняется только из прямоугольного провода. При этом все параллельные провода этой обмотки обязательно должны иметь равные не только площади, но также и размеры поперечного сечения.

В трансформаторах с концентрическими обмотками, в которых магнитный поток рассеяния направлен по оси

стержня, а параллельные провода винтовой обмотки расположены радиально и имеют различные индуктивные и активные сопротивления, для уравнения полного сопротивления этих проводов обязательно производится их транспозиция (перекладка). При транспозиции стремятся, чтобы каждый провод во всей обмотке попеременно занимал все возможные положения в сечении витка.

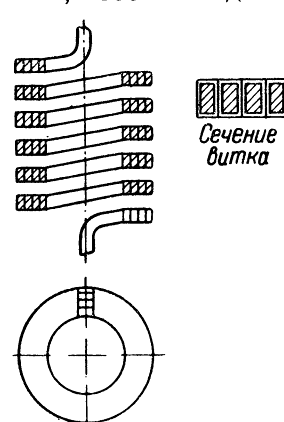



Рис. 4-9. Винтовая параллельная обмотка из шести витков (четыре параллельных провода).

В электропечных трансформаторах с чередующимися обмотками магнитный поток рассеяния направлен радиально. В этом случае радиально расположенные параллельные провода имеют практически одинаковые индуктивные, но вследствие разной длины различные активные сопротивления. Поскольку при этом полные сопротивления параллельных проводов различаются мало, в чередующихся обмотках считают возможным выполнять одноходовую винтовую обмотку без транспозиции проводов. Поэтому в этих трансформаторах также возможна и применяется винтовая параллельная обмотка, намотанная из ряда медных неизолированных проводов. Не исключена также возможность намотки винтовой обмотки из медной неизолированной шины на ребро. Применяется такая обмотка сравнительно редко, так как технология ее изготовления усложнена и требует значительного увеличения мощности обмоточного станка.

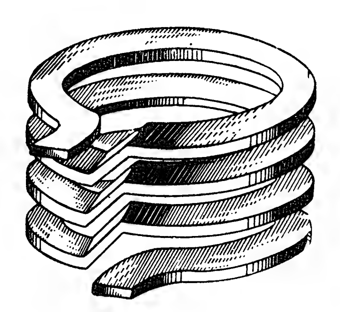


Рис. 4-10. Винтовая обмотка с плоскими витками и опрессованными переходами из витка в виток.

Винтовая параллельная обмотка является достаточно простой и удобной в производстве, и поэтому она получи-

ла широкое распространение как обмотка НН электропечных трансформаторов. Ей свойственны, однако, и некоторые недостатки. Как видно из рис. 4-9, при шести витках в катушке на той образующей, где расположены начало и конец, высота катушки определяется не шестью, а семью высотами провода. Поэтому осевой размер такой обмотки следует всегда рассчитывать на один провод (и одну высоту канала) больше, чем число витков в катушке. Поскольку витки идут по винтовой линии, а опорные поверхности являются плоскостями, перпендикулярными оси обмотки, опорная изоляция усложняется и должна быть набрана из прокладок разной толщины.

Винтовая обмотка может быть выполнена и без увеличения высоты катушки на один провод. Такая обмотка, показанная на рис. 4-10, уже не является в полном смысле винтовой. Ее витки делаются плоскими, а переходы из витка в виток выполняются путем крутого изгиба на ребро всех проводов в одном месте. Опорная изоляция имеет равную толщину по всему периметру витка. Изготовление такой обмотки несколько сложнее, чем обычной винтовой. Она сначала наматывается на станке как винтовая, но вплотную виток к витку без междувитковых каналов, а затем на прессе, сразу во всей катушке, выдавливаются переходы из витка в виток, и витки получают плоскую форму. Иногда междувитковые переходы выдавливаются на ручном приспособлении типа струбцинки.

Винтовая обмотка обладает высокой механической прочностью по отношению к осевым силам, возникающим при коротком замыкании трансформатора. Параллельные провода в ее витках располагаются в радиальном направлении и образуют относительно большую опорную поверхность для междукатушечных прокладок. Достаточную механическую прочность, однако, эта обмотка получает только при некотором минимальном сечении витка, не менее 75—100 *мм*$^2$, что при плотности тока 3—4 *а*/*мм*$^2$ соответствует току около 300 *а* в одной подгруппе обмотки. Эти пределы допустимого сечения витка и тока обмотки соответствуют трансформаторам с мощностью на один стержень $S' = 50 \div 350$ *ква*. При бóльших мощностях нижним пределом применения винтовой обмотки считают обычно 400—500 *а*. По соображениям механической прочности число параллельных проводов в винтовой обмотке выбирается обычно не менее четырех.

Возможность применения винтовой обмотки, все витки которой располагаются один над другим в осевом направлении, иногда ограничивается ее общей высотой. Если суммарная (ориентировочная) высота одного витка и одного канала, получаемая как частное от деления высоты обмотки на число витков, меньше 1 *см*, то выполнение винтовой обмотки практически невозможно.

Вследствие ограничения наименьшего тока обмотки величиной 300—400 *а* и неудобства выполнения отпаек для регулирования напряжения винтовая обмотка не нашла применения на стороне высшего напряжения и применяется только как обмотка низшего напряжения (НН). В электропечных трансформаторах винтовая обмотка является наиболее удобной как обмотка НН и ей обычно оказывают предпочтение, применяя другие типы обмоток для стороны НН лишь в тех случаях, когда винтовая обмотка не проходит по номинальному току или минимальной высоте витка.

Простой спиральной катушечной обмоткой называется обмотка, составленная из ряда расположенных в осевом направлении и соединенных последовательно катушек, намотанных по плоской спирали, с радиальными охлаждающими каналами между всеми или частью катушек. Высота катушки $h_{кат}$ равна высоте провода $b'$ (рис. 4-11).

Спиральная катушечная обмотка называется параллельной, если сечение каждого витка составлено двумя или более параллельными проводами и число витков в катушке более одного.

Спиральная катушечная обмотка может быть непрерывной, т. е. намотанной одним проводом (или двумя, тремя параллельными проводами) без обрыва провода и пайки соединений между катушками.

Обычно спиральную катушечную обмотку стремятся выполнять непрерывной, однако в электропечных трансформаторах для удобства сборки чаще всего применяется обмотка в виде спаренных одинарных катушек, из которых одна наматывается правой, а другая — левой намоткой. Применение различных направлений намотки в соседних катушках позволяет производить их последовательное соединение, соединяя вместе одноименные, например внутренние, концы. При этом начало и конец каждой такой пары катушек будут находиться на наружной поверхности обмотки. Такие две последовательно соединенные одинарные катушки правой и левой намотки, имеющие начало и ко-

нец на наружной поверхности, носят название двойной катушки (рис. 4-12). Обмотку, собранную из отдельно намотанных двойных катушек, иногда называют дисковой.

Если непрерывная спиральная катушечная обмотка наматывается из двух, трех и более параллельных проводов, то во избежание излишнего увеличения радиального размера обмотки в месте перехода из катушки в катушку каждый из параллельных проводов переходит самостоятельно, так, как это изображено на рис. 4-13. При таком переходе провода меняются местами: наружный провод

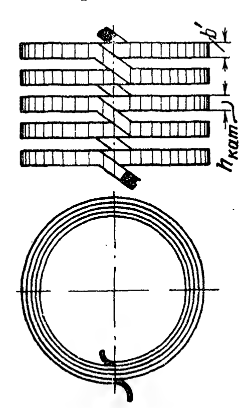



Рис. 4-11. Непрерывная спиральная катушечная обмотка из пяти катушек.

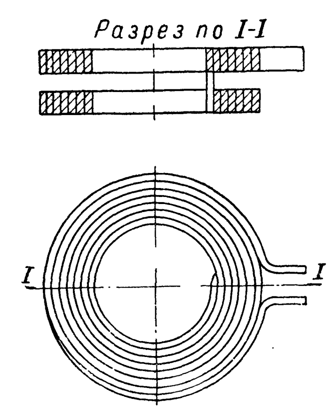



Рис. 4-12. Двойная катушка спиральной катушечной обмотки.

катушки переходит внутрь, внутренний—наружу и т. д. Таким образом осуществляется также транспозиция проводов и выравниваются их сопротивления.

При выполнении обмотки в виде комплекта двойных дисковых катушек переходы параллельных проводов внутри двойной катушки из одной одинарной в другую осуществляются также по рис. 4-13. При намотке этих катушек из нескольких параллельных проводов для обмотки НН при малом числе витков в одинарной катушке (1,5—4 витка), применяются особые приемы, позволяющие равномерно уложить витки в катушках и избежать излишнего увеличения радиального размера катушек в местах перехода проводов.

Вследствие значительного угла изгиба провода на ребро в местах перехода из одной катушки в другую изоляция провода легко повреждается. Поэтому для обеспечения

достаточной электрической прочности междувитковой изоляции в местах перехода обычно усиливают изоляцию путем оплетки провода полосками кабельной бумаги или лакоткани или прокладкой отбортованных полосок из электроизоляционного картона.

Непрерывная спиральная катушечная обмотка может быть намотана на жестком бумажно-бакелитовом цилиндре на рейках, расположенных по образующим цилиндра с междукатушечными прокладками по рис. 4-6 или на цилиндрической оправке с замковыми междукатушечными прокладками по рис. 4-8. В обмотке из дисковых двойных катушек применяются, как правило, только замковые междукатушечные прокладки. Радиальные масляные каналы в той и другой обмотках в электропечных трансформаторах делаются между всеми одинарными катушками.

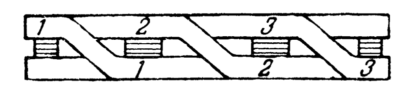


Рис. 4-13. Переход между катушками с транспозицией трех параллельных проводов.

Выбор минимально допустимого числа катушек спиральной катушечной обмотки обычно производится с таким расчетом, чтобы напряжение каждой катушки было не более 800—1 000 *в*. Окончательно выбранное число катушек может быть значительно больше найденного минимального, так как число катушек обмотки такого типа можно при заданных ее размерах широко варьировать, выбирая провода с разными соотношениями размеров и примерно одинаковым поперечным сечением. Это свойство спиральной катушечной обмотки позволяет всегда найти приемлемое распределение ее витков при любых реальных размерах обмотки и заданном числе витков.

Переход провода из одной катушки в другую в непрерывной спиральной катушечной обмотке делается в промежутках между прокладками, образующими радиальные каналы. Число витков в каждой катушке может быть целым или дробным, причем знаменателем является число прокладок по окружности обмотки. В практике предпочитают, однако, укладывать в отдельных катушках целое число витков и добиваться получения необходимого числа витков всей обмотки за счет разных, но отличающихся не более чем на единицу чисел витков в разных катушках обмотки. В двойных дисковых катушках всегда укладывается целое число витков. Если это число нечетное, то в одинар-

ных катушках число витков выражается дробным числом, кратным 0,5. В случае применения этого типа обмотки на стороне ВН с отпайками для регулирования напряжения регулировочные витки должны размещаться в отдельных катушках. Катушки с различными числами витков принято для удобства обозначать различными буквами алфавита.

При размещении витков обмотки в катушках необходимо следить за тем, чтобы радиальные размеры всех катушек были приблизительно равными и отличались один от другого не более чем на одну или в крайнем случае две толщины провода. В чередующейся обмотке такое же равенство радиальных размеров рекомендуется соблюдать для обмоток ВН и НН. В тех случаях, когда этого невозможно добиться простым перемещением витков из одной катушки в другую, допускается выравнивание радиального размера небольшого числа отдельных катушек путем разгона, т. е. вматывания между их витками полосок электроизоляционного картона (рис. 4-14).

Рис. 4-14. Выравнивание радиального размера отдельных катушек.

1 — полоска из электрокартона (разгон).

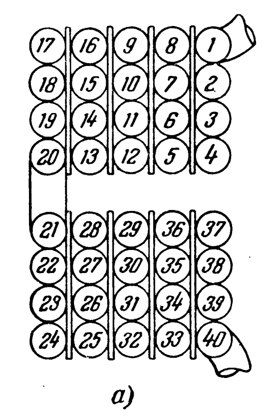
Спиральная катушечная обмотка, как непрерывная, так и дисковая, обладает высокой механической прочностью и может применяться для трехфазных трансформаторов мощностью 180—60 000 *ква* и выше. Эта обмотка может быть применена при различных номинальных токах, когда сечение одного витка при выбранной плотности тока и достаточном числе витков получается равным или бо́льшим минимального по сортаменту сечения прямоугольного провода (5,72 *мм*²). При нормальной плотности тока $\Delta = 3{,}5 \div 4{,}5$ *а/мм*² этому сечению соответствует минимальный ток обмотки ~20—25 *а*.

В электропечных трансформаторах спиральная катушечная обмотка применяется, как правило, для обмоток ВН: из одного провода — при мощности трансформатора до 1 000 *ква* и двух и более параллельных проводов — при мощности 1 000 *ква* и выше. Исключение составляют некоторые трансформаторы мощностью до 400 *ква* с номинальным током на стороне ВН до 20 *а*, для которых применяется многослойная цилиндрическая катушечная обмотка из круглого провода.

Обмотки НН электропечных трансформаторов предпочитают выполнять винтового типа, однако в тех случаях,

когда ток одной параллельной ветви (подгруппы) обмотки не достигает 300 *а* или число витков в подгруппе настолько велико, что их нельзя расположить в подгруппе один над другим, на стороне НН может быть применена также и спиральная катушечная обмотка из нескольких параллельных проводов.

В некоторых электропечных трансформаторах с мощностью до 400 *ква* при напряжении обмотки ВН 10 *кв* и номинальном токе, меньшем 20—25 *а*, применение спиральной катушечной обмотки из прямоугольного провода нерационально. В качестве обмотки ВН в этом случае приме-



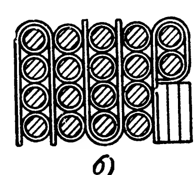




Рис. 4-15. Двойная (*а*) и одинарная (*б*) катушки. Междуслойная изоляция: картон (*а*) и кабельная бумага (*б*).

няется многослойная цилиндрическая катушечная обмотка из круглого провода. Такая обмотка наматывается из одного провода без применения параллельных проводов и для удобства сборки выполняется в виде ряда двойных катушек, разделенных масляными каналами (рис. 4-15,*а*). Каждая одинарная катушка состоит из ряда последовательно соединенных слоев, имеющих цилиндрическую форму, откуда обмотка и получила название цилиндрической. Две одинаковые катушки, составляющие двойную, наматываются в разные стороны: одна — правой, другая — левой намоткой и обычно разделяются радиальным масляным каналом, служащим для изоляции между катушками и улучшения охлаждения.

Осевой канал между обмоткой и изоляционным цилиндром и радиальные каналы между катушками могут быть образованы рейками и междукатушечными электрокартонными прокладками по рис. 4-6 или, что чаще применяется в электропечных трансформаторах, замковыми прокладками по рис. 4-8.

Число витков в одинарных катушках выбирается обычно таким, чтобы рабочее напряжение катушки было не выше 800—1 000 *в*. В качестве междуслойной изоляции служат полоски из телефонной (0,05 *мм*) или кабельной (0,12—0,17 *мм*) бумаги или из электрокартона (0,5 *мм*), закладываемые при намотке катушек. Число витков в одном слое катушки определяется числом проводов, укладывающихся по высоте катушки, без одного. Наружный слой может быть неполностью занят витками. Несколько свободных мест оставляется в этом случае при расчете в качестве резерва для витков, которые по какой-либо причине при намотке катушки не уложились во внутренние слои. Иногда для увеличения механической прочности обмотки вместо недостающих витков на свободное место наматывают полоски электроизоляционного картона или шпагат подходящего диаметра (рис. 4-15,*б*).

При расчете размещения обмотки на стержне число витков в отдельных катушках может быть выбрано различным, чем обеспечивается приемлемое распределение витков при любых реальных размерах обмотки и заданном числе витков. Рекомендуется, однако, у всех катушек выдерживать одинаковые радиальные размеры (равные радиальному размеру обмотки НН) и по возможности одинаковые осевые размеры. Число типов катушек с разными числами витков на одном стержне должно быть не более двух, если обмотка ВН не имеет отпаек для регулирования напряжения, и не более трех — в обмотке с регулированием напряжения.

Пределы применения многослойной цилиндрической катушечной обмотки по току нагрузки ограничиваются пределами сортамента круглого обмоточного провода сечением до 9,79 *мм*² (диаметр 3,53 *мм*), что при максимальной плотности тока в обмотке $\Delta = 4 \div 4,5$ *а/мм*² составляет 40—45 *а*.

Этот тип обмотки обладает меньшей механической прочностью, чем спиральная катушечная обмотка, а также является более дорогим и сложным в производстве. Разделение обмотки на катушки, необходимость наматывать половину катушек левой и половину правой намоткой, частое чередование в катушках слоев и междуслойной изоляции, необходимость пайки соединений между двойными катушками и некоторые другие особенности в значительной степени усложняют процесс изготовления обмоток и требуют от обмотчика более высокой квалификации и большей за-

траты времени, чем при двух других типах обмотки. Поэтому в тех случаях, когда можно применить прямоугольный провод (при токе, большем 25 *а*, и сечении провода не менее 5,72 *мм²*), предпочитают применять спиральную катушечную обмотку.

В электропечных трансформаторах многослойная цилиндрическая катушечная обмотка находит применение как обмотка ВН при рабочем напряжении 10 *кв* и мощности трехфазного трансформатора до 400 *ква* и однофазного до 250 *ква*.

## 4-4. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И РАЗМЕЩЕНИЕ ОБМОТОК

Выбор типа конструкции обмотки электропечного трансформатора при его расчете должен производиться с учетом эксплуатационных и производственных требований, предъявляемых к трансформатору и его обмоткам (см. § 4-1), и свойств обмоток разных типов (§ 4-2 и 4-3). При выборе типа обмотки существенным критерием является площадь поперечного сечения одного витка или — в обмотке, разделенной на параллельные ветви, — одной ветви (сумма сечений параллельных проводов, витка или ветви), в свою очередь определяемая по рабочему току одной параллельной ветви (подгруппы) обмотки:

$$П_в = \frac{I_в}{\Delta_{ср}} \ [мм^2], \qquad (4\text{-}1)$$

где $I_в$ [*а*] — ток одной ветви (подгруппы) обмотки;

$\Delta_{ср}$ [*а/мм²*] — средняя плотность тока в обмотках НН и ВН.

Для определения средней плотности тока $\Delta_{ср}$ можно воспользоваться формулой

$$\Delta_{ср} = 0{,}745k \frac{P_к u_в}{S d_{12}} \ [а/мм^2], \qquad (4\text{-}2)$$

вывод которой приведен в § 5-1. Эта формула связывает искомую среднюю плотность тока в обмотках ВН и НН с заданными полной мощностью трансформатора $S$ [*ква*], потерями короткого замыкания $P_к$ [*вт*] и величинами, определяемыми до расчета обмоток: э. д. с. одного витка $u_в$ [*в*] и средним диаметром обмоток ВН и НН $d_{12}$ [*см*]. Коэффициент $k$ учитывает наличие добавочных потерь в обмотках, потерь в отводах, стенках бака и т. п. Ориен-

Таблица 4-2

**Значения $k$ в формуле (4-2)**

| $S'$ [*ква*] | До 350 | 350—1 000 | Более 1 000 |
|---|---|---|---|
| $k$ | 0,80 | 0,79—0,73 | 0,73—0,65 |

тировочные значения $k$ могут быть взяты из табл. 4-2 в зависимости от мощности обмоток одного стержня $S'$.

Найденное по формуле (4-2) значение плотности тока $\Delta_{ср}$ является ориентировочным средним значением для обмоток ВН и НН. Действительная средняя плотность тока в обмотках должна быть выдержана близкой к этой величине.

Значение $\Delta_{ср}$, полученное из формулы (4-2), следует также сверить с практически применяемыми плотностями тока. Обычно в электропечных трансформаторах принимают $\Delta = 3{,}0 \div 4{,}0$ *а/мм*$^2$ и в редких случаях — до 4,5 *а/мм*$^2$. В этих же пределах можно выбрать плотность тока в том случае, когда потери короткого замыкания $P_к$ не заданы.

После определения средней плотности тока $\Delta_{ср}$ и сечения витка (ветви) $П_в$ для каждой из обмоток можно произвести предварительный выбор типа конструкции обмотки, пользуясь указаниями, сделанными в предыдущих параграфах и сведенными в табл. 4-3.

При выборе конструкции обмотки ВН всегда оказывают предпочтение спиральной катушечной обмотке и применяют ее во всех случаях, когда можно использовать прямоугольный провод. Обмотку НН предпочтительно делать винтовой, однако винтовая обмотка НН не всегда хорошо укладывается в заданные размеры подгрупп и окончательное решение о применении этого или другого типа обмотки НН можно сделать лишь после выбора осевого размера провода.

Следующим шагом после предварительного определения типа обмотки в случае применения прямоугольного провода является рациональный выбор осевого размера этого провода. В винтовых и спиральных катушечных обмотках, имеющих масляные каналы между всеми витками или катушками, каждый провод с двух торцовых сторон своего поперечного сечения омывается и охлаждается маслом. Потери, выделяющиеся в этом проводе в виде тепла,

Таблица 4-3

## Основные свойства и нормальные пределы применения различных типов обмоток в масляных электропечных трансформаторах

| Тип обмотки | Применение на стороне | | Основные свойства | Пределы применения (включительно) | | | | Число параллельных проводов | | Рекомендации |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | главное | возможное | | по мощности на стержень $S'$, *ква* | по току ветви (подгруппы), $I_в$, *а* | по напряжению $U_н$, *кв* | по сечению проводов, витка, $П$, *мм*² | от | до | |
| Винтовая | НН | — | Высокая механическая прочность, надежная изоляция, хорошее охлаждение, удобство намотки | 5 0 и выше | 300 и выше | До 15 | 75—100 и выше | 4 | 30—40 и более | Рекомендуется применять для всех обмоток НН, за исключением случаев, когда по высоте подгруппы винтовая обмотка не раскладывается |
| Спиральная катушечная (непрерывная и дисковая); | ВН | НН | Высокая механическая и электрическая прочность, хорошее охлаждение | 50 и выше | | | | | | Рекомендуется применять для всех обмоток ВН, если сечение витка не менее 5,72 *мм*. |
| а) в один провод | | | | | 20—25 до 280 | 2—3 до 35 | 5,72—62,9 | 1 | 1 | Применяется для обмоток НН при токе $I_в < 300$ *а* и в тех случаях, когда винтовая обмотка не раскладывается по высоте подгруппы |
| б) в два и более параллельных проводов | | | | | 40—50 и выше | 0,1—0,2 до 35 | 15,4—300 и выше | 2 | 3—5 | |
| Многослойная цилиндрическая катушечная | ВН | — | Возможность применения при токах ниже 20—25 *а*. Механическая прочность ниже, охлаждение хуже, чем у спиральной катушечной | До 500 | До 40—45 | До 35 | До 9,79 | 1 | 1 | Рекомендуется применять для обмоток ВН, если сечение витка менее 5,72 *мм*² |

будут тем больше, чем выше плотность тока и сечение провода $ab$ (рис. 4-16). При нормальном режиме работы все потери, возникающие в проводе, должны отводиться в масло, причем переход тепла в масло от провода, находящегося в середине катушки (витка), возможен только через торцовые поверхности (1) провода. Разность температур обмотки и масла при этом будет тем большей, чем больше плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности, определяемой радиальным размером $a$ провода.

Выделим элемент провода обмотки с длиной 1 *см* (рис. 4-16). Объем этого элемента $v = ab1$ [*см*³], вес его $g = v\gamma \cdot 10^{-3} = ab\gamma \cdot 10^{-3}$ [*кг*], где удельный вес меди $\gamma = 8{,}9$ [*г/см*³].

Потери в выделенном элементе объема [см. формулу (5-2)]

$$p = 2{,}4\Delta^2 g = 2{,}4\Delta^2 ab\gamma \cdot 10^{-3} \ [\text{вт}];$$

охлаждаемая поверхность $П = 2a1 \cdot 10^{-4}$ [*м*²]; потери, отнесенные к единице поверхности,

$$q = \frac{p}{П} = \frac{2{,}4\Delta^2 ab 8{,}9 \cdot 10^{-3}}{2a1 \cdot 10^{-4}} = 107b\Delta^2 \ [\text{вт/м}^2].$$

Если заданы максимальные значения $q$ и $\Delta$, то

$$b \leqslant \frac{q}{107\Delta^2} \ [\text{см}]. \tag{4-3}$$

При выводе формулы (4-3) не учтены такие факторы, увеличивающие $q$, как добавочные потери в обмотке и закрытие части торцовой поверхности обмотки междукатушечными прокладками. С другой стороны, не принято во внимание уменьшение $q$ за счет теплоотдачи боковых поверхностей катушки (витка) и увеличения размера $a'$ по сравнению с размером $a$. В первом приближении можно считать действие этих факторов взаимно погашающимся и пользоваться формулой (4-3) как ориентировочной.

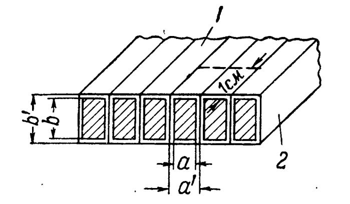



Рис. 4-16. К расчету $q$.
*1* — торцовая поверхность; *2* — боковая поверхность.

Обычно в трансформаторах с естественным масляным охлаждением допускают значение $q \leqslant (1\,200 \div 1\,400)$ *вт/м*² и во всяком случае не более 1 600 *вт/м*². В трансформаторах с искусственной циркуляцией масла допускают $q \leqslant (2\,000 \div 2\,200)$ *вт/м*².

Ориентировочный выбор предельно допустимого осевого размера провода $b$ в зависимости от значений $\Delta$ и $q$ может быть сделан по формуле (4-3) или кривым на рис. 4-17.

Осевой размер провода в чередующейся обмотке ограничен также и допустимой величиной добавочных потерь, вызванных потоком рассеяния. Добавочные потери в такой обмотке (см. § 5-1) пропорциональны четвертой степени осевого размера провода $b$ и квадрату числа проводов в подгруппе в осевом направлении. Они косвенно зависят

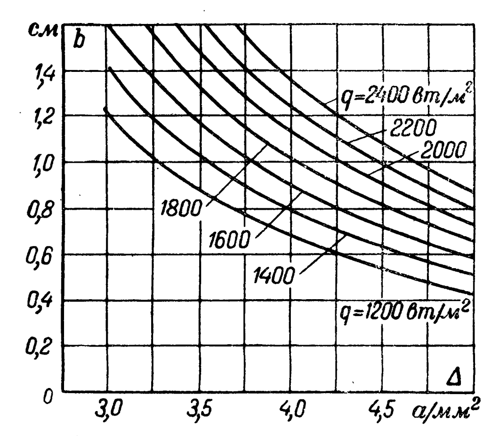



Рис. 4-17. Кривые для выбора $b$ по заданным $q$ и $\Delta$.

также от числа подгрупп обмотки. Обычно, подбирая размеры провода, стараются добиться получения минимальных добавочных потерь и выдержать их в пределах до 10% электрических потерь, и в сравнительно редких случаях—до 15%. Ориентировочно предельный осевой размер провода, дающий добавочные потери не более 10%, может быть выбран по табл. 4-4. При этом следует знать число проводов в подгруппе в осевом направлении, т. е. предварительно произвести раскладку витков в подгруппе обмотки.

Из двух размеров провода $b$, полученных по кривым на рис. 4-17 и табл. 4-4, следует выбрать меньший.

Уточнение типа обмотки НН может быть произведено после ориентировочного выбора осевого размера провода $b$. При этом за число проводов в подгруппе для табл. 4-4 следует принять число витков обмотки НН в од-

Таблица 4-4

**Допустимый размер провода в осевом направлении $b$, *мм* при коэффициенте добавочных потерь $k_д \leqslant 1{,}10$ (провод марки ПББО)**

| Число подгрупп $n_{пгр}$ | Число проводов в подгруппе в осевом направлении | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 2 | 12,5 | 10,8 | 9,3 | 8,0 | 7,4 | 6,9 | 6,4 | 6,4 | 5,9 |
| 4 | 10,8 | 9,3 | 8,0 | 6,9 | 6,4 | 5,9 | 5,5 | 5,1 | 5,1 |
| 6 | 10,0 | 8,0 | 6,9 | 6,4 | 5,9 | 5,5 | 5,1 | 4,4 | 4,4 |
| 8 | 10,0 | 8,0 | 6,9 | 6,4 | 5,5 | 5,1 | 5,1 | 4,4 | 4,4 |
| 10 | 9,3 | 7,4 | 6,4 | 5,9 | 5,5 | 5,1 | 4,4 | 4,4 | 4,4 |
| 12 | 9,3 | 7,4 | 6,4 | 5,9 | 5,1 | 5,1 | 4,4 | 4,4 | 3,8 |

*Продолжение*

| Число подгрупп $n_{пгр}$ | Число проводов в подгруппе в осевом направлении | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 2 | 5,5 | 5,5 | 5,1 | 5,1 | 4,4 | 4,4 | 4,4 | 4,4 | 4,4 | 4,4 |
| 4 | 5,4 | 4,4 | 4,4 | 4,4 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | — | — |
| 6 | 4,4 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | — | — | — | — | — |
| 8 | 4,4 | 3,8 | 3,8 | — | — | — | — | — | — | — |
| 10 | 3,8 | 3,8 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 12 | 3,8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

Примечание. Для неизолированного провода значение $b$, полученное из таблицы следует умножить на 0,9.

ной подгруппе, которое при параллельном соединении всех подгрупп по рис. 2-1,*б* и *в* равно числу витков обмотки НН $w_2$. После выбора меньшего из двух значений $b$, полученных по рис. 4-17 и табл. 4-4, выбирается высота радиального канала между витками $h_к$, которую обычно принимают не менее 0,1 радиального размера обмотки $l_р$.

Ориентировочно $l_р$ можно определить по эмпирической формуле

$$l_р \approx 1{,}5 \sqrt[4]{S'} \ [см], \tag{4-4}$$

где $S'$ — мощность одного стержня [*ква*];

$$h_к \approx 0{,}15 \sqrt[4]{S'} \ [см]. \tag{4-5}$$

Число витков, естественно укладывающихся в высоте $l_2$ подгруппы обмотки НН, при выбранных $b$ и $h_к$ можно определить по формуле

$$w_2' = \frac{l_2 - b}{b + h_к}. \qquad (4\text{-}6)$$

Полученное значение $w_2'$ следует сравнить с числом витков обмотки НН $w_2$. Если

$$w_2' \approx (0{,}8 \div 1{,}2)\, w_2,$$

то может быть применена винтовая обмотка с параллельным соединением всех подгрупп обмотки НН по рис. 2-1,*б* или *в*.

Если $w_2' \approx (0{,}40 \div 0{,}70)\, w_2$, то винтовая обмотка может быть выполнена с последовательным соединением подгрупп обмотки НН в каждой магнитно-уравновешенной группе и параллельным соединением групп обмоток, например по рис. 2-1,*а* или 2-2. В этом случае следует вновь определить допустимый размер провода $b$ по табл. 4-4, считая число проводов в подгруппе равным $\frac{w^2}{2}$.

Если $w_2' < 0{,}40 w_2$, то винтовая обмотка не может быть выполнена и следует выбрать спиральную катушечную обмотку.

После окончательного выбора типа обмотки, если это необходимо, вносятся изменения в схему разделения обмоток на параллельные и последовательные ветви. Расчет обмоток ведется в соответствии с этой уточненной схемой.

## 4-5. РАСЧЕТ ОБМОТОК НН

Расчет обмоток электропечного трансформатора, как правило, начинают с обмотки НН, имеющей значительно меньшее число витков, чем обмотка ВН.

Испытательное напряжение обмотки НН $U_{исп}$ определяется по ее номинальному напряжению по табл. 3-1. Ввиду того что обмотки НН электропечных трансформаторов имеют номинальное напряжение менее 1 *кв*, их испытательное напряжение всегда равно 5 *кв*. По этому испытательному напряжению по табл. 3-2 определяется изоляция между обмоткой и ярмом: $l_0$, $l_{оц}$ и $\delta_ш$ в том случае, когда подгруппы обмоток НН являются крайними на стержне. В противном случае эти размеры определяются по испытательному напряжению обмотки ВН.

Число витков на одну фазу обмотки НН $w_2$ определяется по формуле

$$w_2 = \frac{U_{2ф}}{u_в}, \quad (4\text{-}7)$$

где $u_в$ — напряжение одного витка обмотки, определенное по формуле (2-23).

После определения $w_2$ согласно уточненной схеме разделения обмоток на параллельные и последовательные ветви определяются число витков $w_{2в}$, напряжение $U_{2в}$ и ток $I_{2в}$ одной из параллельных ветвей.

Ориентировочное сечение витка одной ветви

$$П'_{2в} \approx \frac{I_{2в}}{\Delta_{ср}} \ [мм^2]. \quad (4\text{-}8)$$

Согласно указаниям § 4-2 выбирается число междувитковых прокладок по окружности обмотки.

Расчет винтовой обмотки с параллельным соединением всех подгрупп, например по рис. 2-1,*б* и *в*, или 2-3, ведется следующим образом.

Ориентировочная высота провода

$$b = \frac{l_2 + h_к}{w_{2в} + 1} - h_к \ [см], \quad (4\text{-}9)$$

где $l_2$ [*см*] — высота подгруппы обмотки НН;
$h_к$ [*см*] — высота радиального канала между витками (см. § 4-4).

В случае, когда применяется винтовая обмотка с плоскими витками и специально выгнутыми переходами из одного витка в другой без увеличения высоты катушек на один виток,

$$b = \frac{l_2 + h_к}{w_{2в}} - h_к \ [см]. \quad (4\text{-}9')$$

Если полученный по формуле (4-9) размер $b$ не превосходит размеров $b$, найденных для обмотки по рис. 4-17 и табл. 4-4 (число проводов в подгруппе $w_2$), то он может быть принят. В противном случае следует выбрать наименьшее из трех значений $b$. Затем для выбранного значения $b$ и сечения витка $П'_{2в}$ по табл. 4-1 следует подобрать необходимое число параллельных проводов с соблюдением следующих требований:

а) Минимальное число паралельных проводов 4.

б) Все параллельные провода должны иметь одинаковые размеры и площадь поперечного сечения.

Подобранные размеры проводов записываются так:

$$\text{число параллельных проводов} \times \frac{\text{размеры провода без изоляции}}{\text{размеры провода в изоляции}}:$$

$$n_{2в} \times \frac{a \times b}{a' \times b'}.$$

Полное сечение витка

$$П_{2в} = n_{2в} П'_2 \ [мм^2], \qquad (4\text{-}10)$$

где $П'_2$ — сечение одного провода.

Полученная плотность тока

$$\Delta_2 = \frac{I_{2в}}{П_{2в}} \ [а/мм^2]. \qquad (4\text{-}11)$$

Осевой размер одной подгруппы обмотки

$$l_2 = b'(w_{2в} + 1) + w_{2в} h_к k \ [см]. \qquad (4\text{-}12)$$

Коэффициент $k$ в формуле (4-12) учитывает усадку междукатушечных прокладок после сушки и опрессовки обмоток и может быть принят равным 0,94—0,96.

В том случае, когда обмотки двух подгрупп в каждой группе НН соединены последовательно, расчет производится в том же порядке, но формулы (4-9) и (4-12) записываются по-другому.

Формула (4-9) приобретает вид:

а) обычная винтовая обмотка, подгруппы конструктивно объединены (рис. 2-2)

$$b = \frac{2l_2 + h_к}{w_{2в} + 1} - h_к \ [см]; \qquad (4\text{-}9а)$$

б) то же, но обмотка с плоскими витками

$$b = \frac{2l_2 + h_к}{w_{2в}} - h_к \ [см]; \qquad (4\text{-}9б)$$

в) обычная винтовая обмотка, подгруппы конструктивно разделены (рис. 2-1,$a$)

$$b = \frac{l_2 + h_к}{\frac{w_{2в}}{2} + 1} - h_к \ [см]; \qquad (4\text{-}9в)$$

г) то же, но обмотка с плоскими витками

$$b = \frac{2\,(l_2 + h_к)}{w_{2в}} - h_к \ [см]. \qquad (4\text{-}9г)$$

Для тех же случаев формула (4-12) приобретает вид:

а) $l_2 = 0{,}5\,[b'(w_{2в}+1) + kh_к\,(w_{2в}-1)]$ [$см$]; (4-12а)

б) $l_2 = 0{,}5\,[b'w_{2в} + kh_к\,(w_{2в}-2)]$ [$см$]; (4-12б)

в) $l_2 = b'\left(\frac{w_{2в}}{2}+1\right) + kh_к\,\frac{w_{2в}}{2}$ [$см$]; (4-12в)

г) $l_2 = b'w_{2в} + kh_к\,(w_{2в}-1)$ [$см$]. (4-12г)

При определении высоты подгруппы обмотки НН по формулам (4-12) подставляются окончательно выбранные реальные размеры провода с изоляцией $b'$ и канала $h_к$.

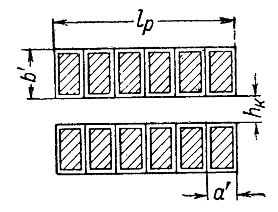


Рис. 4-18. Определение радиального размера обмотки.

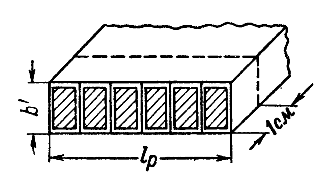


Рис. 4-19. К определению плотности теплового потока на поверхности обмотки.

Дальнейший расчет винтовой обмотки проводится одинаково для всех ее типов. Радиальный размер обмоток (рис. 4-18)

$$l_{2р} = n_{2в}a' \ [см]. \qquad (4\text{-}13)$$

Внутренний диаметр обмотки

$D'_2 = d + 2a_{01}$ [$см$] [см. формулу (2-29)].

Наружный диаметр обмотки

$$D''_2 = D'_2 + 2l_{2р} \ [см[. \qquad (4\text{-}14)$$

После окончательного расположения обмотки определяют плотность теплового потока на ее охлаждаемой маслом поверхности $q$ ($вт/м^2$). Рассмотрим элемент катушки обмотки длиной 1 $см$ (рис. 4-19).

Объем элемента $v = \Pi_к 1 \cdot 10^{-2}$ [$см^3$],

где $\Pi_к$ — полное сечение проводов катушки [$мм^2$]; для винтовой обмотки $\Pi_к = \Pi_{2в}$; для спиральной катушечной обмотки $\Pi_к = w_к \Pi_в$ — числу витков в катушке, умноженному на сечение витка.

Вес элемента

$$g = \Pi_к 1 \cdot 10^{-5} \gamma \text{ [кг]}.$$

Потери в элементе (см. § 5-1)

$$p = 2{,}4\Delta^2 \Pi_к \cdot 10^{-5} \gamma k_д = 21{,}35 k_д \Delta^2 \Pi_к \cdot 10^{-5} \text{ [вт]},$$

где $k_д$ — коэффициент, учитывающий добавочные потери в обмотке (§ 5-1). До расчета потерь в обмотках можно принять $k_д = 1{,}1$.

Поверхность охлаждения элемента

$$\Pi_о = 2(l_р + b') 1 \cdot 10^{-4} k \text{ [м}^2\text{]},$$

где $k$ — коэффициент, учитывающий закрытие части поверхности изоляционными деталями. Можно принять $k \approx 0{,}75$. Тогда

$$q = \frac{p}{\Pi_0} = \frac{21{,}35 k_д \Delta^2 \Pi \cdot 10^{-5}}{2(l_р + b') 1 \cdot 10^{-4} k};$$

замечая, что $\Delta \Pi_к = I w_к$ (для винтовой обмотки $\Delta \Pi_к = I_{2в}$), получим:

$$q = 1{,}07 \frac{\Delta I w_к k_д}{(l_р + b') k}. \qquad (4\text{-}15)$$

Величину $q$ для винтовых и спиральных катушечных обмоток обычно допускают 1 200—1 400 $вт/м^2$ и не более 1 600 $вт/м^2$ при естественном масляном охлаждении, и 1 800—2 000 $вт/м^2$ и не более 2 200 $вт/м^2$ — при охлаждении с принудительной циркуляцией масла.

В том случае, когда обмотка НН выполняется в виде спиральной катушечной, ее расчет проводится в следующем порядке.

Для обмотки определяются число витков на одну фазу обмотки $w_2$ [формула (4-7)], число витков $w_{2п}$, напряжение $U_{2п}$ и ток $I_{2п}$ одной подгруппы (по схеме разделения обмоток), ориентировочное сечение витка одной подгруппы $\Pi_{2п}$ [формула (4-8)]. По кривым на рис. 4-17 опре-

деляется наибольший допустимый размер провода $b$, выбираются ориентировочный размер канала [формула (4-5)] и число междукатушечных прокладок по окружности обмотки (см. § 4-2).

Ориентировочное число катушек в одной подгруппе обмотки определяется по формуле

$$n'_{2к} = \frac{l_2 + h_к}{b + h_к}. \quad (4\text{-}16)$$

Найденное по этой формуле число катушек округляется до ближайшего четного числа $n_{2к}$, а затем размер провода $b$ проверяют по табл. 4-4, считая, что число проводов в осевом направлении равно $n_{2к}$.

После этого по табл. 4-1 подбирается необходимое число параллельных проводов с одинаковыми размерами и площадью поперечного сечения так, чтобы осевой размер подобранного провода был не больше допустимых осевых размеров, полученных по кривым на рис. 4-17 и табл. 4-4. Данные по подобранному проводу записываются так:

число параллельных проводов в витке $\times$ $\dfrac{\text{размеры провода без изоляции}}{\text{размеры провода в изоляции}}$:

$$n_{2в} \times \frac{a \times b}{a' \times b'}.$$

Число витков в катушке определяется по формуле

$$w_{2к} = \frac{w_{2п}}{n_{2к}}. \quad (4\text{-}17)$$

Число $w_{2к}$ может быть целым или дробным. Целое число предпочтительно, так как упрощает работу обмотчика, однако в обмотках НН, имеющих малое число витков с большим поперечным сечением, часто бывает удобно избрать дробное $w_{2к}$. В этом случае знаменателем дроби должно быть число междукатушечных прокладок по окружности обмотки.

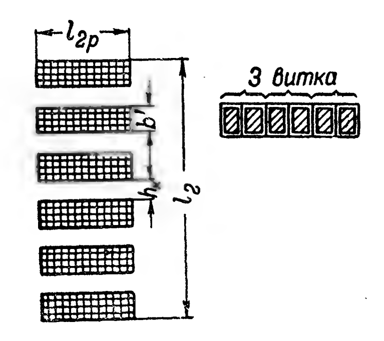



Рис. 4-20. К расчету спиральной катушечной обмотки НН (6 катушек, 3 витка по два параллельных провода в катушке).

Для лучшей раскладки обмотки, например для полу-

чения целого числа $w_{2к}$, иногда бывает удобно увеличить (только до четного числа) число катушек $n_{2к}$ в подгруппе. Этого можно добиться, выбирая провод с меньшим размером $b$, чем тот, который принят в формуле (4-16).

Осевой размер одной подгруппы обмотки (рис. 4-20)

$$l_2 = n_{2к}b' + (n_{2к} - 1) h_к k \; [см]. \tag{4-18}$$

Радиальный размер обмотки

$$l_{2р} = n_{2в} w_{2к} a' \; [см]. \tag{4-19}$$

Если $w_{2к}$ — число дробное, то подставляют ближайшее большее целое число.

Внутренний и наружный диаметры обмотки определяются по формулам (2-29) и (4-14), плотность теплового потока на поверхности обмотки $q$—по формуле (4-15).

## 4-6. РАСЧЕТ ОБМОТОК ВН

При расчете обмотки ВН необходимо прежде всего обеспечить ее достаточную электрическую прочность; это достигается правильным выбором испытательного напряжения, а также размеров и конструкции изоляции обмотки.

Испытательное напряжение обмотки ВН $U_{исп}$ определяется по ее рабочему напряжению по табл. 3-1. Затем по табл. 3-2 и рис. 3-2, 3-3 и 3-5 находятся размеры основных изоляционных промежутков и толщины барьеров из твердых изоляционных материалов в этих промежутках, т. е.

изоляция от стержня:

промежутки — $a_{ц1}$ и $a_{01}$; барьер — $\delta_ц$;

изоляция от ярма:

промежуток — $l_0$; барьер — $\delta_ш$; размер $l_{оц}$;

изоляция между обмотками:

промежуток — $a_{12}$; барьер — $\delta_{12}$; размер — $b$;

изоляция между обмотками ВН соседних стержней:

промежуток — $a_{22}$; барьер — $\delta_{22}$.

Изоляция от ярма определяется по испытательному напряжению обмотки ВН только в том случае, когда подгруппы этой обмотки являются крайними на стержне. При

расположении на краях подгрупп обмотки НН размеры $l_0$, $l_{оц}$ и $\delta_ш$ определяются по ее испытательному напряжению.

Большинство электропечных трансформаторов выпускается с регулированием напряжения обмотки НН. Это регулирование осуществляется путем изменения числа витков обмотки ВН, подключаемых к первичной сети. Помимо пересоединения обмотки ВН с треугольника на звезду, регулирование в этой обмотке выполняется на отпайках, позволяющих изменить напряжение не только в $\sqrt{3}$ раз, но также с меньшими ступенями.

Для того чтобы получить уменьшение напряжения обмотки НН по сравнению с номинальным, необходимо увеличивать коэффициент трансформации, а следовательно, число витков обмотки ВН, что ведет к дополнительному увеличению расхода меди на обмотку ВН. С ростом числа включенных витков обмотки ВН рабочий ток обмотки падает и, следовательно, дополнительные витки могут быть выбраны меньшего сечения. Полученная при этом экономия меди несколько снижает общий расход меди, остающийся тем не менее значительно бо́льшим, чем в трансформаторах без регулирования напряжения. Для размещения регулировочных витков требуется также дополнительное место в окне сердечника, что ведет к увеличению веса стали.

Размещение регулировочных витков обмотки ВН на стержне должно быть таким, чтобы их включение и выключение не нарушали симметрии и магнитного равновесия в группах обмотки. Схема регулирования должна быть простой и позволять производить как пересоединение обмоток ВН с треугольника на звезду, так и переключение ступеней обмотки.

Пример такой схемы размещения обмоток и их соединения показан на рис. 4-21. Регулирование напряжения производится с перерывом нагрузки и после отсоединения обмотки ВН трансформатора от первичной сети. Управление переключателями с треугольника на звезду и переключателями ступеней напряжения производится с пульта управления при помощи специального приводного механизма, установленного на трансформаторе. В том случае, когда регулирование напряжения должно производиться без перерыва нагрузки, схема размещения обмоток и вывода концов от них к переключателям остается принципиально такой же, но усложняется схема соединения переключателей и подвода тока к ним от сети.

Обмотка ВН трехфазного электропечного трансформатора, предназначенного для питания дуговой сталеплавильной печи, рассчитывается для соединения в треугольник. При соединении этой обмотки в звезду ее фазный ток остается неизменным, а линейный уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, вследствие чего также в $\sqrt{3}$ раз уменьшается мощность трансформатора.

Расчет обмотки ВН начинается с определения общего числа витков на фазу $w_1$, а также расчета напряжения $U_{1п}$, числа витков $w_{1п}$ и тока $I_{1п}$ одной подгруппы обмотки. Для трансформатора без регулирования напряжения

$$w_1 = w_2 \frac{U_1}{U_2}. \qquad (4\text{-}20)$$

Величины $U_{1п}$, $w_{1п}$ и $I_{1п}$ определяются по схеме разделения обмотки на подгруппы. Обычно все подгруппы обмотки ВН одного стержня трехфазного и обоих стержней однофазного трансформаторов соединяются последовательно. В этом случае: для трехфазного трансформатора

$$w_{1п} = \frac{w_1}{n_{пгр}};\ U_{1п} = \frac{U_1}{n_{пгр}};\ I_{1п} = I_1;$$

для однофазного трансформатора

$$w_{1п} = \frac{w_1}{2n_{пгр}};\ U_{1п} = \frac{U_1}{2n_{пгр}};\ I_{1п} = I_1.$$

Если не все подгруппы обмотки соединены последовательно, то определение $w_{1п}$, $U_{1п}$, $I_{1п}$ производится по реальной схеме разделения обмоток.

В трансформаторах с регулированием напряжения обмотки НН, выполняемым путем изменения числа витков обмотки ВН, расчет обмотки ВН усложняется. В задании на расчет обычно указывается четное число ступеней напряжения обмотки НН. Число отпаек (ступеней) от обмотки ВН принимают равным половине числа ступеней НН, используя удвоение числа разных напряжений (НН) при пересоединении обмотки ВН с треугольника на звезду. Так, например, если число ступеней напряжения обмотки НН должно быть равно 8, то на обмотке ВН делают 4 отпайки и получают 8 различных напряжений обмотки НН при соединении обмотки ВН в треугольник и звезду.

При таком методе регулирования только половина ступеней напряжения может быть выбрана произвольно, так как ступения второй половины будут в $\sqrt{3}$ раз больше или меньше соответствующих ступеней первой половины.

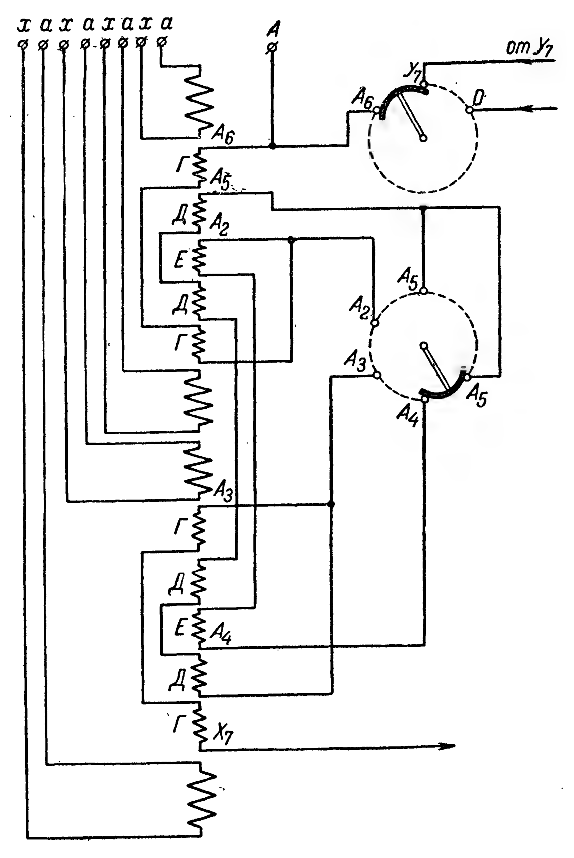



Рис. 4-21. Схема обмоток ВН и НН одной фазы трансформатора с регулированием напряжения.

С этим приходится считаться при выборе ступеней напряжения, отвечающих также и требованиям эксплуатации.

Полное число витков обмотки ВН при наличии регулирования напряжения определяется по формуле (4-20), в которую вместо напряжения обмотки НН $U_2$ следует подставить наименьшее напряжение НН, получаемое при соединении обмотки ВН в треугольник.

Регулировочные витки в обмотке трансформатора необходимо располагать так, чтобы их включение и выключение не приводили к нарушению магнитного равновесия или симметричности расположения подгрупп обмотки. Рассмотрим для примера схему обмоток ВН трансформатора с регулированием напряжения, показанную на рис. 4-21. Расположение регулировочных витков (катушки *Д* и *Е*) отвечает поставленному выше требованию. Обмотка ВН имеет четыре отпайки и позволяет получить восемь различных напряжений НН. Эти напряжения, расположенные по величине от большего к меньшему, обозначим:

$$U_{21},\ U_{22},\ U_{23},\ U_{24},\ U_{25},\ U_{26},\ U_{27},\ U_{28}.$$

Первые четыре напряжения соответствуют соединению обмотки ВН в треугольник, последние четыре — в звезду. При напряжении $U_{21}$ трансформатор отдает полную номинальную мощность $S_н$, при напряжениях $U_{22}$—$U_{28}$ мощность $S_2$, отдаваемая трансформатором, снижается пропорционально напряжению. Ток обмотки ВН $I_1$ равен ее номинальному току $I_{1н}$ при соединениях, обеспечивающих напряжения НН, равные $U_{21}$ и $U_{25}$. При остальных соединениях ток обмотки ВН $I_1$ уменьшается. Это обстоятельство позволяет выполнять регулировочные катушки с сечением витка меньшим, чем у основных катушек. Для расчета линейного $k_л$ и фазного $k_ф$ коэффициентов трансформации, числа витков обмотки ВН на отпайках, тока этой обмотки $I_1$ и мощности трансформатора $S$ удобно пользоваться таблицей типа табл. 4-5.

Для примера, разобранного в табл. 4-5, число витков обмотки ВН для основной ступени напряжения НН и получения номинальной мощности трансформатора (катушки *Г*) составляет:

$$w_Г = w_2 \frac{U_1}{U_{21}}.$$

Число витков и наибольшие токи в катушках обмотки ВН могут быть подсчитаны по табл. 4-6.

Дальнейший расчет обмотки ВН трансформатора с регулированием напряжения, т. е. выбор провода, распределение витков обмотки по катушкам и т. д., принципиально не отличается от расчета обмоток трансформатора, не имеющего регулирования. Поэтому далее будет дан порядок расчета для трансформатора без регулирования напряжения и по ходу этого расчета будут даваться указания,

Таблица 4-5

**К расчету трехфазного электропечного трансформатора с регулированием напряжения обмотки НН со стороны обмотки ВН (8 ступеней напряжения НН)**

| Напряжение НН | Схема соединения обмоток ВН | Положение переключателей* (замкнуты) | Включены катушки ВН* | Коэффициены трансформации: линейный $k_л$ | Коэффициены трансформации: фазный $k_ф$ | Число витков обмотки ВН $w_1$ | Ток обмотки ВН | Мощность трансформатора $S$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_{21}$ | △ | $A_2—A_3$; $A_6—Y_7$ | *Г* | $\frac{U_1}{U_{21}}$ | $\frac{U_1}{U_{21}}$ | $w_2\frac{U_1}{U_{21}}$ | $I_{1н}$ | $S_н$ |
| $U_{22}$ | △ | $A_3—A_4$; $A_6—Y_7$ | *Г* и *Е* | $\frac{U_1}{U_{22}}$ | $\frac{U_1}{U_{22}}$ | $w_2\frac{U_1}{U_{22}}$ | $I_{1н}\frac{U_{22}}{U_{21}}$ | $S_н\frac{U_{22}}{U_{21}}$ |
| $U_{23}$ | △ | $A_2—A_5$; $A_6—Y_7$ | *Г* и *Д* | $\frac{U_1}{U_{23}}$ | $\frac{U_1}{U_{23}}$ | $w_2\frac{U_1}{U_{23}}$ | $I_{1н}\frac{U_{23}}{U_{21}}$ | $S_н\frac{U_{23}}{U_{21}}$ |
| $U_{24}$ | △ | $A_4—A_5$; $A_6—Y_7$ | *Г*, *Д* и *Е* | $\frac{U_1}{U_{24}}$ | $\frac{U_1}{U_{24}}$ | $w_2\frac{U_1}{U_{24}}$ | $I_{1н}\frac{U_{24}}{U_{21}}$ | $S_н\frac{U_{24}}{U_{21}}$ |
| $U_{25}$ | ⅄ | $A_2—A_3$; $O—Y_7$ | *Г* | $\frac{U_1}{U_{25}}=\frac{U_1}{U_{21}}\sqrt{3}$ | $\frac{U_1}{U_{21}}$ | $w_2\frac{U_1}{U_{21}}$ | $I_{1н}$ | $S_н\frac{U_{25}}{U_{21}}$ |
| $U_{26}$ | ⅄ | $A_3—A_4$; $O—Y_7$ | *Г* и *Е* | $\frac{U_1}{U_{26}}=\frac{U_1}{U_{22}}\sqrt{3}$ | $\frac{U_1}{U_{22}}$ | $w_2\frac{U_1}{U_{22}}$ | $I_{1н}\frac{U_{22}}{U_{21}}$ | $S_н\frac{U_{26}}{U_{21}}$ |
| $U_{27}$ | ⅄ | $A_2—A_5$; $O—Y_7$ | *Г* и *Д* | $\frac{U_1}{U_{27}}=\frac{U_1}{U_{23}}\sqrt{3}$ | $\frac{U_1}{U_{23}}$ | $w_2\frac{U_1}{U_{23}}$ | $I_{1н}\frac{U_{23}}{U_{21}}$ | $S_н\frac{U_{27}}{U_{21}}$ |
| $U_{28}$ | ⅄ | $A_4—A_5$; $O—Y_7$ | *Г*, *Д* и *Е* | $\frac{U_1}{U_{28}}=\frac{U_1}{U_{24}}\sqrt{3}$ | $\frac{U_1}{U_{24}}$ | $w_2\frac{U_1}{U_{24}}$ | $I_{1н}\frac{U_{24}}{U_{21}}$ | $S_н\frac{U_{28}}{U_{21}}$ |

* См. схему на рис. 4-21.

| Катушки | Число витков | Ток |
|---|---|---|
| *Г* | $w_Г = w_2 \frac{U_1}{U_{21}}$ | $I_Г = I_{1н}$ |
| *Д* | $w_Д = w_2 \left(\frac{U_1}{U_{23}} - \frac{U_1}{U_{21}}\right)$ | $I_Д = I_{1н} \frac{U_{23}}{U_{21}}$ |
| *Е* | $w_Е = w_2 \left(\frac{U_1}{U_{22}} - \frac{U_1}{U_{21}}\right)$ | $I^Е = I_{1н} \frac{U_{22}}{U_{21}}$ |

относящиеся к особенностям трансформатора с регулированием напряжения.

Плотность тока в обмотке ВН выбирается такой, чтобы средняя плотность тока в обмотках ВН и НН была близка к ранее определенной [см. формулу (4-2)]:

$$\Delta_1' = 2\Delta_{ср} - \Delta_2 \ [а/мм^2]. \quad (4\text{-}21)$$

Ориентировочное сечение витка

$$П_{1в}' = \frac{I_{1п}}{\Delta_1'} \ [мм^2]. \quad (4\text{-}22)$$

По этому сечению витка по сортаменту обмоточного провода (см. табл. 4-1) подбирается изолированный прямоугольный провод марки ПББО так, чтобы больший его размер *b* был не больше допустимого по кривым на рис. 4-17 и табл. 4-4. Поскольку число катушек в подгруппе обмотки ВН, необходимое для пользования табл. 4-4, еще неизвестно, можно воспользоваться предельным размером *b*, найденным по этой таблице для обмотки НН. Для обмотки ВН чаще всего подбирается один провод, реже два-три параллельных провода с одинаковыми размерами и площадью поперечного сечения.

В обмотках ВН с регулированием напряжения сечение дополнительных регулировочных витков определяется по формуле (4-22) по их наибольшим токам (катушки *Д* и *Е* по табл. 4-6).

После подбора прямоугольного провода рассчитывается спиральная катушечная обмотка. В том случае, когда сечение витка $\Pi'_{1в}$ оказывается меньше 5,72 *мм*², подбирается круглый изолированный провод марки ПБ и рассчитывается многослойная цилиндрическая катушечная обмотка.

Данные по подобранному проводу записываются так: прямоугольный

$$n_{1в} \times \frac{a \times b}{a' \times b'} \; [мм];$$

сечение

$$\Pi_{1в} = n_{1в} \Pi'_1 \; [мм^2];$$

круглый

$$d/d' \; [мм],$$

где $d$ и $d'$ — диаметр провода без изоляции и с изоляцией;

сечение

$$\Pi_{1в} \; [мм^2].$$

После окончательного выбора сечения провода проверяется плотность тока:

$$\Delta_1 = \frac{I_{1п}}{\Pi_{1в}} \; [а/мм^2].$$

Расчет спиральной катушечной обмотки. Радиальный размер обмотки $l'_{р1}$ предварительно принимается равным радиальному размеру обмотки НН $l_{2р}$. Число витков в катушке

$$w_{1к} = \frac{10 l'_{1р}}{n_{1в} a'}, \qquad (4\text{-}23)$$

где $l'_{1р}$ — [*см*]; $a'$ — [*мм*].

Число катушек в подгруппе

$$n_{1к} = \frac{w_{1п}}{w_{1к}}. \qquad (4\text{-}24)$$

При наличии регулирования напряжения такой расчет размещения витков в катушке производится для основных катушек (катушки *Г* по табл. 4-6), а затем таким же образом рассчитываются дополнительные катушки (*Д* и *Е*) с регулировочными витками.

Число катушек в подгруппе $n_{1к}$, найденное по формуле (4-24), округляется до ближайшего четного числа, если по схеме разделения обмоток крайними подгруппами на стержне являются подгруппы обмотки ВН (например, по рис. 2-2), и до ближайшего целого числа, если крайние подгруппы принадлежат обмотке НН (см. рис. 2-1).

Число катушек подгруппы должно быть подобрано так, чтобы рабочее напряжение каждой катушки было не больше 800—1 000 *в*, что можно проверить по формуле

$$U_{1к} = \frac{U_{1п}}{n_{1к}} \leqslant 800 \div 1\,000 \text{ в}. \tag{4-25}$$

Если $U_{1к} > 1\,000$ *в*, то следует увеличить число катушек и уменьшить число витков в катушке за счет выбора другого провода с меньшим значением размера $b$. В катушке в целях упрощения работы обмотчика желательно иметь целое число витков. В обмотке ВН этого можно добиться, применяя в каждой подгруппе два типа катушек с числом витков, отличающимся на единицу. В отдельных случаях возможна намотка дробного числа витков в катушке так, чтобы знаменателем дроби служило число междукатушечных прокладок по окружности обмотки.

Регулировочные витки обмоток должны быть уложены в четное число отдельных катушек. При этом число витков и радиальные размеры каждой из таких катушек иногда оказываются меньшими, чем у основных катушек. Для выравнивания радиального размера в этом случае в катушке между ее витками прокладываются полоски картона (рис. 4-14).

Высота радиальных каналов между катушками $h_к$ [*см*] выбирается так, чтобы

$$h_к \geqslant 0{,}1 l_{1р}, \text{ но не менее } 0{,}4 \text{ см}.$$

Осевой размер одной подгруппы обмотки (трансформатор без регулирования напряжения)

$$l_1 = n_{1к} b' + (n_{1к} - 1) h_к k \text{ [см]}, \tag{4-26}$$

где $k = 0{,}94 \div 0{,}96$ учитывает опрессовку изоляции после сушки обмотки.

Радиальный размер обмотки

$$l_{1р} = n_{1в} w_{1к} a' \cdot 10^{-1} \text{ [см]}. \tag{4-27}$$

Если $w_{1к}$ — число дробное, то подставляют ближайшее большее целое число. Для обмотки с регулированием напряжения, в которой размеры $b'$ и $h_к$ могут быть неодинаковыми у разных катушек, при расчете осевого размера можно воспользоваться формулой

$$l_1 = \Sigma b' + \Sigma h_к k \ [см]. \tag{4-28}$$

Внутренний диаметр обмотки определяется по формуле

$$D'_1 = d + 2a_{01} \ [см] \tag{4-29}$$

и должен быть равен внутреннему диаметру обмотки НН $D'_2$.

Наружный диаметр

$$D''_1 = D'_1 + 2l_{1р} \ [см]. \tag{4-30}$$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки $q_1$ определяется по формуле (4-15) и должна быть выдержана в пределах, указанных при выводе этой формулы.

Если обмотка ВН выполняется как многослойная цилиндрическая катушечная из круглого провода, то ее расчет производится в следующем порядке.

Определяется ориентировочное число катушек в подгруппе:

$$n'_{1к} = \frac{U_{1п}}{800 \div 1\,000}. \tag{4-31}$$

Полученное по формуле (4-31) число катушек округляется до ближайшего большего четного $n_{1к}$. Далее, ориентировочно определяется раскладка витков обмотки по катушкам.

Число витков в катушке определяется по формуле

$$w'_{1к} = \frac{w_{1п}}{n_{1к}}. \tag{4-32}$$

Число слоев в катушке

$$n'_{1сл} \approx \frac{10 l'_{1р}}{d'}, \tag{4-33}$$

где $l'_{1р}$ [*см*] радиальный размер обмотки ВН, примерно равный радиальному размеру обмотки НН $l_{2р}$;

$d'_1$ [*мм*] — диаметр провода, выбранного для обмотки с изоляцией.

Число витков в слое

$$w'_{1сл} = \frac{w'_{1к}}{n'_{1сл}}. \qquad (4\text{-}34)$$

После предварительного размещения витков обмотки по катушкам производится окончательное определение числа витков в катушках $w_{1к}$, числа слоев $n_{1сл}$ и числа витков в слое $w_{1сл}$. При этом должны быть соблюдены следующие правила:

а) Число типов катушек, различающихся по числу витков, не больше 2.

б) В каждой катушке размещается целое число витков.

в) Общее число витков в катушках одной подгруппы равно $w_{1п}$.

Размеры катушек определяются по формулам:

осевой

$$h_{кат} = d'(w_{1сл} + 1) \cdot 10^{-1} \ [см]; \qquad (4\text{-}35)$$

радиальный

$$l_{1р} = [d' n_{1сл} + \delta_{мсл}(n_{1сл} - 1)] \cdot 10^{-1} \ [см], \qquad (4\text{-}36)$$

где $\delta_{мсл}$ [*мм*] — толщина междуслойной изоляции — выбирается по табл. 3-4.

Высота (осевой размер) канала между катушками $h_к \approx \approx 0{,}1 l_{1р}$, но не менее 0,4 *см*.

Осевой размер подгруппы обмотки

$$l_1 = h_{кат} n_{1к} + k h_к (n_{1к} - 1) \ [см], \qquad (4\text{-}37)$$

где $k = 0{,}94 \div 0{,}96$ учитывает опрессовку изоляции после сушки трансформатора.

После окончательного размещения обмотки и определения размеров катушек проверяется плотность теплового потока на поверхности обмотки $q_1$ по формуле

$$q_1 = 1{,}07 \frac{\Delta_1 I_1 w_{1к} k_д}{(l_{1р} + h_{кат})\, k}. \qquad (4\text{-}38)$$

Полученное значение $q_1$ должно лежать в пределах до 1 000—1 200 *вт/м²*. Если $q_1$ не укладывается в эти пределы, то следует увеличить число катушек в подгруппе, уменьшив число витков в катушке и ее осевой размер.

Таблица 4-7

**Размеры проводов и шин отводов при различных токах, *мм***

| *I, а* | Размер шины | *I, а* | Размер шины | *I, а* | Размер шины | *I, а* | Размер шины |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 22,5 | ⌀2,44 | 206 | ⌀ 7,4 | 634 | 4,4×30 | 2 300 | 6×80 |
| 35 | ⌀3,05 | 265 | ⌀ 8,6 | 845 | 4,4×40 | 2 400 | 5×100 |
| 63,5 | ⌀4,1 | 324 | ⌀10,0 | 960 | 5,0×40 | 2 560 | 7×80 |
| 83 | ⌀4,7 | 462 | ⌀12,5 | 1 260 | 4,4×50 | 2 750 | 8×80 |
| 115 | ⌀5,5 | 408 | 2,83×30 | 1 490 | 5×60 | 3 380 | 8×100 |
| 155 | ⌀6,4 | 528 | 4,4 ×25 | 1 920 | 5×80 | 3 750 | 10×100 |
| | | | | | | 4 200 | 12,5×100 |

После завершения расчета обмоток НН и ВН определяется полная высота комплекта обмоток на одном стержне:

$$l = n_{пгр}(l_1 + l_2) + h_к k(n_{пгр} - 1) + n_{пгр}a_{12}k \ [см]. \quad (4\text{-}39)$$

После расчета обмоток выбираются размеры шин отводов НН и ВН, для чего можно воспользоваться табл. 4-7.

*ГЛАВА ПЯТАЯ*

# РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИХ СИЛ В ОБМОТКАХ

## 5-1. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Потерями короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называются потери, возникающие в трансформаторе в том случае, когда к одной из обмоток на отпайки, соответствующие номинальной мощности, подведено напряжение короткого замыкания (см. § 5-2), а другая обмотка, также на соответствующих отпайках, замкнута накоротко. При этом в обеих обмотках устанавливаются номинальные токи.

Потери короткого замыкания $P_к$ в трансформаторе могут быть разделены на следующие составляющие: 1) электрические потери в обмотках НН и ВН, вызванные рабочим током обмоток: $P_{1э}$ и $P_{2э}$; 2) добавочные потери в обмотках НН и ВН, вызванные потоком рассеяния, пронизывающим обмотки и создающим неравномерное распре-

деление тока по сечению проводников: $P_{1д}$ и $P_{2д}$; 3) электрические потери в отводах между обмотками и вводами (проходными изоляторами) трансформатора: $P_{1от}$ и $P_{2от}$; 4) добавочные потери в отводах, вызванные потоком рассеяния отводов: $P_{1от.д}$ и $P_{2от.д}$; 5) потери в стенках бака и других металлических элементах конструкции трансформатора, вызванные потоком рассеяния обмоток и отводов, $P_б$. Из произведенного подразделения следует, что потери короткого замыкания зависят от разных факторов и, в частности, от потока рассеяния обмоток и отводов. Эта зависимость потерь от потока рассеяния особенно существенно сказывается в трансформаторах, предназначенных для питания электрических печей и имеющих чередующиеся обмотки и шинные отводы большого сечения. При расчете и конструировании этих трансформаторов в целях получения наименьших потерь короткого замыкания необходимо следить за правильным расположением обмоток и отводов. Рекомендации по их рациональному размещению даются при изложении методов расчета отдельных составляющих потерь.

Потери короткого замыкания для всех силовых трансформаторов, в том числе и электропечных, рассчитываются для условно принятой номинальной рабочей температуры меди обмоток и отводов $+75°$ С. Добавочные потери в обмотках и отводах обычно рассчитывают, определяя коэффициент $k_д$, учитывающий увеличение электрических потерь вследствие наличия потока рассеяния. Так, например, сумма электрических и добавочных потерь в обмотке заменяется выражением

$$P_э + P_д = P_э k_д.$$

Таким образом, полные потери короткого замыкания могут быть выражены формулой

$$P_к = P_{1э} k_{1д} + P_{2э} k_{2д} + P_{1от} k_{1от.д} + P_{2от} k_{2от.д} + P_б \ [вт]. \quad (5\text{-}1)$$

В технических условиях или ГОСТ на трансформаторы, как правило, указываются гарантийное значение потерь короткого замыкания, а также допустимое отклонение потерь готового трансформатора от этой величины в сторону увеличения. Для электропечных трансформаторов это отклонение обычно допускается не более $+(10 \div 20)\%$, для нормальных силовых $+10\%$. Учитывая, что потери гото-

вого трансформатора вследствие нормальных допустимых отклонений в размерах его частей и несовершенства методов расчета также могут отличаться от расчетной величины, рекомендуется допускать отклонение расчетных потерь короткого замыкания от гарантийной величины не более чем на половину допуска, установленного техническими условиями. Если по окончании расчета потерь отклонение в бо́льшую сторону составляет более половины допуска, то обмотки должны быть пересчитаны. Отклонение потерь в меньшую сторону от гарантийной величины допустимо, однако получение пониженных потерь возможно только за счет дополнительного расхода меди на обмотки и отводы.

Определение электрических потерь в обмотках. Для определения электрических потерь можно воспользоваться формулой $P_э = I^2 R$ [*вт*], однако в практике принято пользоваться этой формулой в преобразованном, более удобном для расчета виде. Заменяя ток $I$ произведением плотности тока в обмотке $\Delta$ [*а/мм*$^2$] на сечение витка $П$ [*мм*$^2$] и раскрывая значение $R = \frac{\rho l}{П}$, где $\rho$ — удельное сопротивление медного провода, а $l$ — полная длина проводника в *м*, получаем: $P_э = \Delta^2 П^2 \frac{\rho l}{П} = \Delta^2 (Пl)\rho$; заметив, что выражение, стоящее в скобках $(Пl)$, представляет собой объем провода обмотки, выраженный в *см*$^3$, умножаем и делим правую часть равенства на удельный вес меди $\gamma_м$ и множитель $10^3$:

$$P_э = \Delta^2 \left( Пl \frac{\gamma_м}{10^3} \right) \rho \frac{10^3}{\gamma_м}.$$

Заменив в этом выражении произведение, заключенное в скобки, равным ему весом меди обмотки $G_м$, выраженным (в *кг*), и подставив значение $\gamma_м = 8{,}9$ *кг/дм*$^3$ и значение удельного сопротивления меди при температуре $+75°$ С $\rho = 0{,}02135$ *ом·мм*$^2$*/м*, получаем окончательно:

$$P_э = 2{,}4 \Delta^2 G_м \, [вт]. \qquad (5\text{-}2)$$

Вес меди каждой из обмоток может быть найден по формуле (рис. 5-1)

$$G_м = c \pi D_{ср} n w П \gamma_м \cdot 10^{-5} \ [кг], \qquad (5\text{-}3)$$

где $c$ — число активных (несущих обмотки) стержней трансформатора;

$D_{ср}$ — средний диаметр обмотки, *см*;

$n$ — число параллельных ветвей обмотки одного стержня;

$w$ — число витков обмотки на один стержень;

$П$ — сечение одного витка (одной параллельной ветви), *мм*$^2$.

Подставляя значения $\pi$ и $\gamma_м = 8,9$ *кг/дм*$^3$, получим:

$$G_м = 28cD_{ср}nwП \cdot 10^{-5} \; [кг]. \qquad (5\text{-}4)$$

Формула (5-4) может применяться как для чередующихся, так и для концентрических обмоток НН и ВН. Во всех случаях под $D_{ср}$ следует понимать средний диаметр данной обмотки. При определении потерь в обмотках ВН в формулу (5-4) подставляют число витков на номинальной ступени напряжения. При определении общего веса меди обмотки ВН подставляют максимальное число витков.

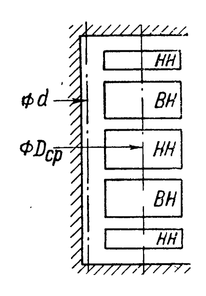



Рис. 5-1. К определению веса меди чередующихся обмоток.

Обычно предельное значение потерь короткого замыкания бывает задано. Это обстоятельство налагает ограничения на выбор плогности тока при расчете обмоток трансформаторов. Выше было показано, что электрические потери в обмотках могут быть подсчитаны по формуле (5-2). Подставляя в эту формулу значение $G_м$ из формулы (5-4), получим:

$$P_э = 2,4\Delta^2 28cD_{ср}nwП \cdot 10^{-5}.$$

Далее, заменяем

$$w = \frac{U_с}{u_в} \text{ и } nП = \frac{I_с}{\Delta},$$

где $U_с$ и $I_с$ — напряжение и полный ток обмотки одного стержня:

$$P_э = 2,4\Delta^2 28cD_{ср}\frac{U_с}{u_в} \cdot \frac{I_с}{\Delta} \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2};$$

замечая, что $U_c I_c \cdot 10^{-3} c = S$ [*ква*] — полная мощность трансформатора, получаем потери в одной обмотке:

$$P_э = 0{,}672 \frac{S}{u_в} D_{ср} \Delta \ [вт]. \tag{5-5}$$

Электрические потери в обмотках двухобмоточного трансформатора определяются формулой

$$P_э = 0{,}672 \frac{S}{u_в} (D_{1ср} \Delta_1 + D_{2ср} \Delta_2) \ [вт]. \tag{5-6}$$

Для трансформатора с чередующейся обмоткой $D_{1ср} \approx \approx D_{2ср} \approx d_{12}$; тогда можно считать

$$(D_{1ср} \Delta_1 + D_{2ср} \Delta_2) = 2 d_{12} \Delta_{ср},$$

где $\Delta_{ср} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}$ — средняя арифметическая плогность тока в обмотках. Тогда

$$P_э = 1{,}344 \frac{S d_{12}}{u_в} \Delta_{ср}$$

и далее

$$\Delta_{ср} = 0{,}745 \frac{P_э u_в}{S d_{12}}. \tag{5-7}$$

Можно показать, что формула (5-7) будет достаточно точной также и для концентрической обмотки.

Электрические потери в обмотках электропечного трансформатора составляют от 65—70 до 80—85% потерь короткого замыкания $P_к$. Обозначив это отношение $\frac{P_э}{P_к} = k$ и подставив $k P_к = P_э$ в выражение (5-7), получим:

$$\Delta_{ср} = 0{,}745 k \frac{P_к u_в}{S d_{12}} \ [а/мм^2]. \tag{5-8}$$

Значения $k$ для электропечных трансформаторов могут быть взяты из табл. 5-1.

Таблица 5-1

**Значения $k$ в формуле (5-8)**

| Мощность на стержень $S'$, *ква* | До 350 | 350—1 000 | Более 1 000 |
|---|---|---|---|
| $k$ | 0,80 | 0,79—0,73 | 0,73—0,65 |

Формула (5-8) связывает среднюю плотность тока в обмотках трансформатора с заданными величинами $S$, $P_к$ и величинами, определяемыми в начале расчета до выбора конструкции обмоток: $d_{12}$ и $u_в$. Эта формула позволяет уже в начале расчета с достаточной точностью выбрать среднюю плотность тока в обмотках в зависимости от заданных потерь короткого замыкания.

Добавочные потери в обмотках. Выше было указано, что определение добавочных потерь в обмотках практически сводится к расчету коэффициента увеличения основных электрических потерь обмотки $k_д$. Этот коэффициент подсчитывается отдельно для каждой обмотки трансформатора. Значение коэффициента $k_д$ зависит от геометрических размеров проводников обмотки и их расположения по отношению к полю рассеяния трансформатора.

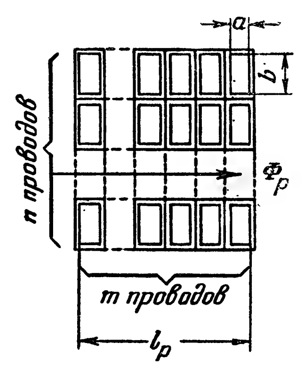


Рис. 5-2. К определению добавочных потерь в обмотках.

Любая обмотка трансформатора, намотанная прямоугольным или круглым проводом, может быть для расчета коэффициента $k_д$ условно представлена в таком виде, как на рис. 5-2. При этом в такой условной обмотке должно быть сохранено число проводников реальной обмотки в параллельном и перпендикулярном направлениях по отношению к потоку рассеяния. Наличие каналов, параллельных потоку рассеяния, как это будет видно из расчетных формул, не влияет на величину $k_д$. Наличие каналов, перпендикулярных направлению потока рассеяния, влияет на $k_д$ только за счет увеличения общего размера обмотки $l_р$.

Для обмотки из медного прямоугольного провода при $f = 50$ *гц* $k_д$ определяется по формуле

$$k_д = 1 + b^4 \beta \frac{n^2 - 0,2}{10}. \qquad (5\text{-}9)$$

Для круглого медного провода

$$k_д = 1 + d^4 \beta \frac{n^2 - 0,21}{22}; \qquad (5\text{-}10)$$

для формулы (5-9)

$$\beta = \left(\frac{am}{l_р} k_р\right)^2;$$

для формулы (5-10)

$$\beta = \left(\frac{dm}{l_р} - k_р\right)^2.$$

Значение $\beta$ для изолированного провода всегда меньше единицы, а для неизолированного—меньше или равно единице.

$n$ — число проводников обмотки в направлении, перпендикулярном направлению потока рассеяния;

$m$ — число проводников обмотки в направлении, параллельном направлению потока рассеяния;

$b$ — размер проводника, перпендикулярный направлению потока рассеяния;

$a$ — размер проводника, параллельный направлению потока рассеяния;

$l_р$ — общий размер обмотки в направлении потока рассеяния;

$d$ — диаметр круглого проводника без изоляции;

$k_р$ — коэффициент приведения поля рассеяния (см. § 5-2).

Значения $a$, $b$, $d$ и $l_р$ при определении $k_д$ следует выражать в сантиметрах.

В концентрических обмотках направление потока рассеяния совпадает с осевым направлением обмотки, в обмотках чередующихся — с радиальным. Расчет $k_д$ для чередующихся обмоток ведется для одной подгруппы обмотки (рис. 5-3).

Из формул (5-9) и (5-10) видно, что величина добавочных потерь пропорциональна четвертой степени размера проводника ($b$ или $d$), измеренного в направлении, перпендикулярном направлению потока рассеяния. Поэтому в концентрических обмотках с осевым направлением потока рассеяния или в обмотках реакторов следует ста-

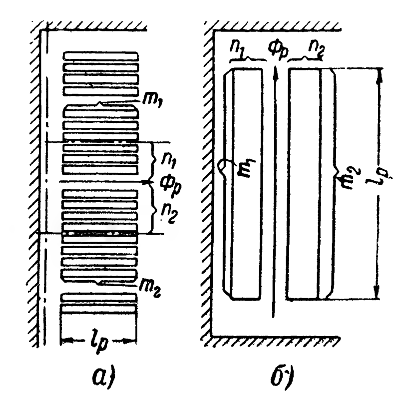



Рис. 5-3. Обозначения величин для расчета добавочных потерь в чередующихся (а) и концентрических (б) обмотках.

раться располагать прямоугольный провод бо́льшим размером в осевом направлении, т. е. плашмя. При намотке того же провода на ребро добавочные потери возрастают в несколько раз.

В чередующихся обмотках, где направление потока рассеяния радиально, наоборот, было бы желательно в целях уменьшения добавочных потерь наматывать провод на ребро, однако применяемые обычно конструкции чередующихся обмоток — винтовые, спиральные, катушечные — не допускают намотки на ребро.

При расчете этих обмоток стараются выбирать провод с меньшим размером $b$ и тем не менее считаются с относительно повышенными добавочными потерями.

Добавочные потери в концентрических обмотках из прямоугольного провода обычно достигают от 0,5—1,0 до 3,0—5,0% и в чередующихся обмотках электропечных трансформаторов от 3—5% до 8—10 и 15%. В обмотках из круглого провода с диаметром не более 4 *мм* добавочные потери составляют не более 1%.

Определение потерь в отводах. Электрические потери в отводах рассчитываются, так же как и для обмоток, по формуле

$$P_{от} = 2{,}4\Delta^2 G_{от}\ [вт]. \quad (5\text{-}11)$$

Точный расчет потерь в отводах возможен лишь после окончательного установления конструкции и всех размеров, определяющих вес отводов и плотность тока в них. В процессе расчета обычно приходится определять потери короткого замыкания еще до того, как окончательно установлена конструкция бака и отводов трансформатора. В этом случае можно произвести предварительный приближенный расчет веса отводов и потерь в них.

Сечение отводов и плотность тока в отводах как на стороне ВН, так и на стороне НН в первом приближении могут быть приняты равными сечению и плотности тока соответствующих обмоток. Общая длина шин отводов каждой обмотки определяется схемой отводов, размерами обмотки и высотой бака (рис. 5-4). Обмотки НН электропечного трансформатора обычно соединяются над крышкой его бака, поэтому начала и концы всех параллельных ветвей обмотки НН выводятся на крышку. Длина каждого отвода приближенно может быть принята равной $2l$, где $l$—высота обмотки трансформатора. Схема соединения обмоток ВН также выполняется над крышкой или на пере-

ключателе под крышкой. В том и другом случаях начала и концы обмоток ВН должны быть выведены в верхнюю часть бака и их длина может быть принята равной $2l$.

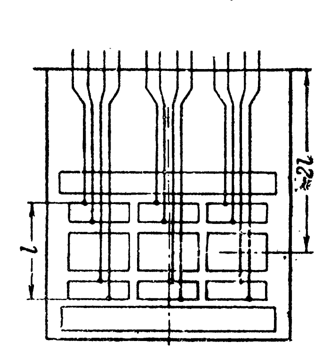



Рис. 5-4. К определению длины отводов ($n = 2$; $c = 3$; $l_{\text{отв}} \approx 4 \cdot 2 \cdot 3l = 24l$).

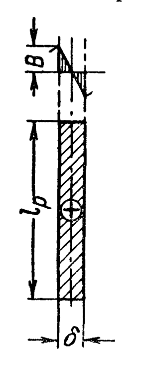



Рис. 5-5. Одиночная шина отводов $\left(n = 1;\ a = \frac{\delta}{2}\right)$.

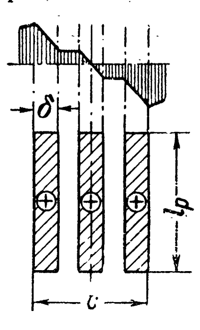



Рис. 5-6. Группа шин с одинаковым направлением тока $\left(n = \frac{3}{2};\ a = \delta\right)$.

Таким образом, общая длина отводов от любой обмотки трансформатора (НН или ВН) может быть приближенно найдена так:

$$l_{\text{от}} \approx 2 \cdot 2lnc = 4lnc \ [см], \tag{5-12}$$

где $l$ — высота обмотки, *см*;
$n$ — число параллельных ветвей обмотки на одном стержне;
$c$ — число активных стержней ($c = 3$ для трехфазного, и $c = 2$ для однофазного трансформатора).

Вес меди отводов

$$G_{\text{от}} \approx l_{\text{от}} \Pi_{\text{от}} \gamma_{\text{м}} \cdot 10^{-5} \ [кг], \tag{5-13}$$

где $\Pi_{\text{от}}$ $[мм]^2$ — сечение отвода, примерно равное сечению витка одной параллельной ветви обмотки.

Для отводов ВН можно ограничиться найденной приближенной величиной потерь и не вносить в нее дальнейших уточнений. Для отводов НН после окончательного установления их конструкции и размеров следует произвести уточнение электрических потерь, а также определить добавочные потери.

Отводы НН обычно выполняются в виде ряда параллельно расположенных шин, обращенных одна к другой широкими сторонами. Рассмотрим несколько различных случаев взаимного расположения шин. На рис. 5-5 показаны одиночная шина (прямой отвод) и распределение индукций магнитного поля рассеяния шины по ее толщине при условии, что обратный отвод достаточно удален и находится на расстоянии $d > 2l_р$. В этом случае для определения $k_д$ при $f = 50$ *гц* можно применить формулу (5-9), выведенную для обмотки трансформатора, положив в ней:

$$b = \frac{\delta}{2}; \; n = 1; \; \beta = \frac{1 l_р}{l_р} k_р \approx 1,$$

т. е. считаем:

$$k_д = 1 + \frac{\delta^4}{200}. \tag{5-14}$$

Для изображенной на рис. 5-6 группы шин, обтекаемых током одного направления (прямой отвод), также может быть применена формула (5-9) при условии, что обратный отвод расположен достаточно далеко, если в этой формуле положить:

$n =$ половине числа шин;

$$b = \delta; \; \beta \approx \left( \frac{l_р}{l_р + 0,6c} \right)^2.$$

тогда

$$k_д = 1 + \delta^4 \beta \frac{n^2 - 0,2}{10}. \tag{5-15}$$

В случае, когда обратный отвод расположен достаточно близко (рис. 5-7), получаем полную аналогию с обмоткой трансформатора, и в формуле (5-9) следует положить:

$n =$ числу шин одной группы (для рис. 5-7 $n = 3$); $\beta = \left( \frac{l_р}{l_р + d + c} \right)^2$. При двух шинах (прямой и обратной) $n = 1$ и

$$k_д = 1 + \frac{\delta^4 \beta}{12,5}. \tag{5-16}$$

Поле рассеяния для группы чередующихся прямых и обратных шин отводов при достаточно большом числе шин, изображенное на рис. 5-8, для каждой шины анало-

гично полю рассеяния одиночной шины (рис. 5-5). В этом случае применение формулы (5-9) при $n=1$; $b=\frac{\delta}{2}$ и $\beta \approx \left(\frac{l_р}{l_р+0,6\delta}\right)^2$ дает следующий результат:

$$k_д = 1 + \frac{\delta^4 \beta}{200}. \qquad (5\text{-}17)$$

Значения β для формул (5-14) — (5-17) получены экспериментальным путем [Л. 6].

Точный расчет потерь, вызванных потоком рассеяния обмоток и отводов в стенках и крышке бака и других элементах конструкции трансформатора, представляет чрезвычайно сложную задачу. Учитывая, однако, что эти

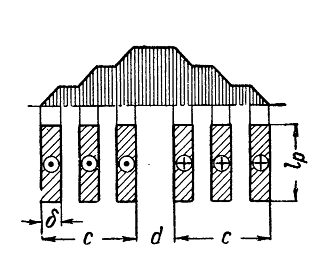


Рис. 5-7. Две группы шин с обратными направлениями токов ($n=3$; $a=\delta$).

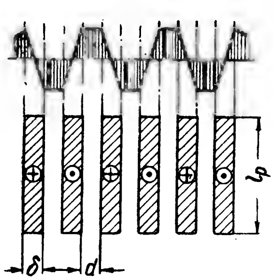


Рис. 5-8. Группа чередующихся прямых и обратных шин отводов $\left(n=1;\ a=\frac{\delta}{2}\right)$.

потери составляют сравнительно небольшую долю (5—20%) полных потерь короткого замыкания и даже значительная ошибка в их определении не отзовется решающим образом на общей величине потерь, в практике обычно пользуются упрощенными методами, позволяющими быстро найти удовлетворительный результат.

Потери $P_б$ от потоков рассеяния обмоток, отводов и вводов трансформатора в элементах конструкции, т. е. в стенках и крышке бака, прессующих балках ярем, крепежных деталях и т. д., ориентировочно могут быть определены по формуле

$$P_б = \frac{k_б}{100}(P_{1э} + P_{2э} + P_{1от} + P_{2от}) \ [вт], \qquad (5\text{-}18)$$

Таблица 5-2

**Определение значений $k_б$ для формулы (5-18)**

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $M$ | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,10 |
| $k_б$ [%] | 2,5 | 2,8 | 3,0 | 3,14 | 3,25 | 3,4 | 3,5 | 3,6 | 3,7 | 3,8 |
| $M$ | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| $k_б$ [%] | 3,8 | 4,3 | 4,7 | 5,05 | 5,35 | 5,55 | 5,75 | 5,9 | 6,1 | 6,25 |
| $M$ | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 10,0 |
| $k_б$ [%] | 6,25 | 7,8 | 9,1 | 10,1 | 11,2 | 12,3 | 13,2 | 14,2 | 15,2 | 16,0 |
| $M$ | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | — | — | — | — |
| $k_б$ [%] | 16,0 | 23,8 | 31,6 | 40 | 50 | 62 | — | — | — | — |

где $k_б$ определяется по табл. 5-2 в зависимости от величины $M$, зависящей от схемы соединений обмоток НН,

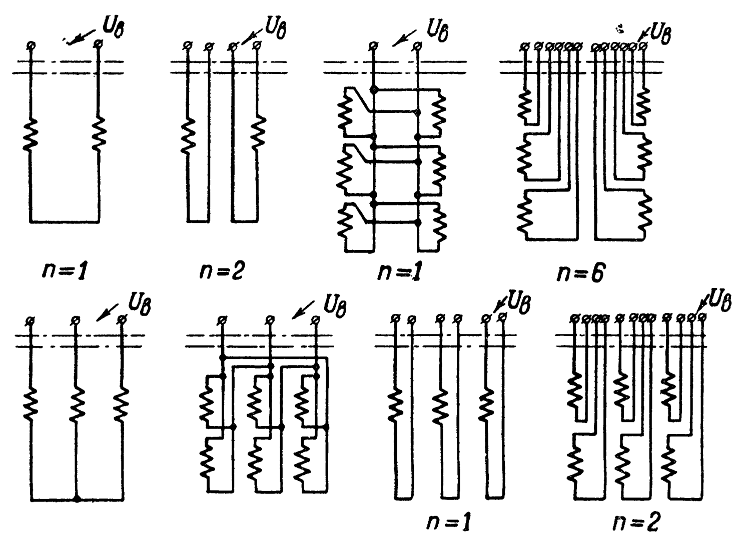



Рис. 5-9. К определению $n$ и $U_в$ в формулах (5-20) и (5-21).

числа параллельных ветвей НН, выведенных на крышку трансформатора и тока одной ветви. Для однофазного трансформатора $M$ определяется по формуле

$$M = \frac{S \cdot 10^3}{n^2 U_в^2}. \quad (5\text{-}19)$$

Для трехфазного трансформатора, если соединение в звезду или треугольник выполнено под крышкой и на крышку выведены только три конца,

$$M = \frac{S \cdot 10^3}{2U_в^2}; \qquad (5\text{-}20)$$

если все начала и концы фазных обмоток выведены на крышку,

$$M = \frac{S \cdot 10^3}{3n^2U_в^2}. \qquad (5\text{-}21)$$

В формулах (5-19) — (5-21):
$S$ [*ква*] — полная мощность трансформатора;
$U_в$ [*в*] — напряжение между двумя вводами НН;
$n$ — число пар вводов НН на крышке на одну фазу.

На рис. 5-9 показано, как определяются $n$ и $U_в$ для некоторых частных случаев.

## 5-2. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Напряжением короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называется напряжение, которое следует подвести при номинальной частоте к зажимам одной из обмоток при замкнутой накоротко другой обмотке, чтобы в обеих обмотках установились номинальные токи. При этом переключатель должен находиться в положении, соответствующем номинальному напряжению.

Напряжение короткого замыкания определяет падение напряжения в трансформаторе, его внешнюю характеристику и ток короткого замыкания. Оно учитывается также при подборе трансформаторов для параллельной работы. Трансформаторы, служащие для питания электрических печей, не применяются для параллельной работы. Для этих трансформаторов напряжение короткого замыкания имеет значение как фактор, ограничивающий ток короткого замыкания и определяющий внешнюю характеристику.

Для всех трансформаторов напряжение короткого замыкания и его составляющие принято выражать в процентах номинального напряжения, а активную составляющую определять для средней эксплуатационной температуры обмоток $+75°$ С. Активная составляющая напряжения короткого замыкания, выраженная в вольтах для одной фазы трансформатора, может быть записана так:

$$U_а = r_к \cdot I_н \; [в],$$

где $r_к$ — активное сопротивление короткого замыкания одной фазы трансформатора, приведенное к одной из его обмоток и рассчитанное с учетом добавочных потерь в обмотках, потерь в отводах и металлических конструкциях (от потоков рассеяния); $I_н$ — номинальный фазный ток обмотки, к числу витков которой приведено сопротивление $r_к$.

Выражая активную составляющую в процентах номинального напряжения $U_н$ (для одной фазы), получаем:

$$u_а = \frac{U_а}{U_н} 100 = \frac{r_к I_н}{U_н} 100.$$

Далее, умножая числитель и знаменатель на число фаз $m$, и номинальный ток $I_н$, получаем формулу (5-22), справедливую для трансформатора с любым числом фаз:

$$\frac{r_к I_н^2 m}{U_н I_н m} 100 = \frac{P_к}{S \cdot 10^3} 100;$$

$$u_а = \frac{P_к}{10S} [\%], \qquad (5\text{-}22)$$

где $P_к$ — потери короткого замыкания трансформатора, *вт*;
$S$ — номинальная мощность трансформатора, *ква*.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, выраженная в вольтах, для одной фазы трансформатора может быть записана так: $U_р = x_к I_н$, где $x_к = x_1 + x_2'$ — реактивное сопротивление одной фазы трансформатора, приведенное к одной из его обмоток.

При расчете $x_к$ следует под $x_1$ и $x_2'$ понимать суммарные индуктивные сопротивления соответствующих обмоток и отводов. У нормальных силовых трансформаторов индуктивность отводов обычно во много раз меньше индуктивности обмотки, поэтому при расчете этих трансформаторов реактивным сопротивлением отводов, как правило, пренебрегают. У электропечных трансформаторов обычно учитывают индуктивность отводов на стороне НН, пренебрегая ею для отводов стороны ВН. Выражая реактивную составляющую в процентах фазного номинального напряжения $U_н$, получаем:

$$u_р = \frac{x_к I_н}{U_н} 100 [\%]. \qquad (5\text{-}23)$$

В трансформаторах для электропечных установок иногда применяется концентрическое расположение обмоток НН и ВН. Из общей теории трансформаторов известно, что реактивное сопротивление обмоток одной фазы трансформатора для этого простейшего случая взаимного расположения обмоток по рис. 5-10 при равной высоте обмоток и равномерном распределении витков по их высоте может быть выражено в виде:

$$x_{к} = \frac{7{,}92 f w^2 \pi d_{12}}{l} \left( a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) k_{р} \cdot 10^{-8} \ [ом]. \qquad (5\text{-}24)$$

Обозначив выражение $\left( a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) = a_{р}$, подставив значение $x_{к}$ в выражение (5-23) и заменив в этом выражении $U_{н}$ на $u_{в} w$, получим:

$$u_{р} = \frac{7{,}92 f w I_{н} \pi d_{12} a_{р} k_{р}}{u_{в} l} 10^{-6} \ [\%]. \qquad (5\text{-}25)$$

Отношение $\frac{\pi d_{12}}{l} = \beta$ является одним из основных соотношений, определяющих распределение активных материалов в трансформаторе. Вводя это обозначение и заменив в числителе выражения (5-25) число витков $w = \frac{U_{н}}{u_{в}}$, получим:

$$u_{р} = \frac{7{,}92 f S' \beta a_{р} k_{р}}{u_{в}^2} 10^{-3} \ [\%]. \qquad (5\text{-}26)$$

При подсчете $u_{р}$ по формулам (5-25) и (5-26), а также при всех дальнейших расчетах следует пользоваться реальными размерами рассчитанных обмоток трансформатора ($a_1$, $a_2$, $a_{12}$, $d_{12}$, $l$ и т. д.), а не приближенными значениями $\beta_1$, $a_{р}$ и $d_{12}$, найденными при определении основных размеров трансформатора. Весь расчет напряжения короткого замыкания удобнее всего производить для одного стержня трансформатора. Поэтому при пользовании формулами для определения $u_{р}$ при расчете как трехфазного, так и однофазного трансформатора следует подставлять в эти формулы номинальные ток, напряжение и мощность, а также число витков обмотки одного стержня.

Коэффициент $k_{р}$, учитывающий отклонение реального потока рассеяния от идеального параллельного потока,

вызванное конечным значением осевого размера обмоток $l$ по сравнению с их радиальными размерами ($a_1$, $a_2$, $a_{12}$), для случая расположения обмоток по рис. 5-10, может быть подсчитан по формуле

$$k_р = 1 - \sigma\left(1 - e^{-\frac{1}{\sigma}}\right), \quad (5\text{-}27)$$

где

$$\sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi l}. \quad (5\text{-}28)$$

Определить $k_р$ можно также по кривым на рис. 5-16, приняв $sk = \infty$. Обычно для концентрических обмоток значение $k_р$ колеблется в пределах 0,93—0,98.

Обмотки реакторов, входящих в состав электропечного трансформаторного агрегата, по форме аналогичны кон-

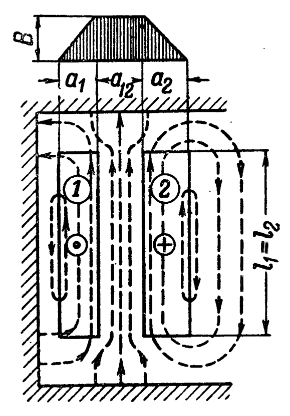
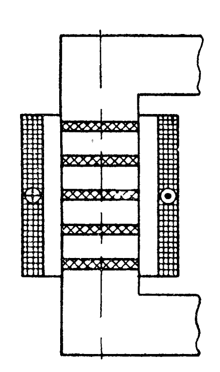


Рис. 5-10. Поле рассеяния двух концентрических обмоток.


Рис. 5-11. Расположение обмоток реактора на сердечнике.

центрическим обмоткам трансформаторов (рис. 5-11). Потоком рассеяния реактора является та часть магнитного потока $\Phi_р$, которая находится вне стального сердечника, а именно в пространстве между внешней поверхностью сердечника и внутренней поверхностью обмотки, а также внутри объема обмотки. К потоку рассеяния в этом случае следует отнести также ту часть линий поля, которая проходит лишь через часть немагнитных зазоров в стали стержня и замыкается вокруг проводов обмотки вне сердечника через масло или воздух. Линии этой части поля

могут проходить в стержне по высоте одного, двух и более элементов, создавая некоторое увеличение индукции в средних по высоте стержня немагнитных зазорах.

Вследствие наличия потока рассеяния полное число потокосцеплений обмотки реактора увеличивается, что в свою очередь ведет к увеличению индуктивного сопротивления реактора. Это увеличение сопротивления должно учитываться при расчете.

Поле рассеяния реактора является более сложным, чем поле обмоток двухобмоточного трансформатора; оно имеет как продольную (параллельно оси обмотки), так и поперечную составляющие, и методика расчета, установленная для двухобмоточного трансформатора, в этом случае применена быть не может.

Количественный учет потока рассеяния реактора представляет чрезвычайно сложную задачу. Конфигурация поля рассеяния будет различной между обмотками разных фаз в окне сердечника реактора и для частей обмоток вне окна; она будет существенно зависеть от числа и размеров немагнитных зазоров в стержне, ширины канала между стержнем и обмоткой, формы и размеров обмотки. В зависимости от сочетания этих размеров в поле может преобладать продольная или поперечная составляющая, что потребует применения различных методик расчета.

Ввиду того что реактор является не главной частью агрегата, а поток рассеяния составляет сравнительно малую часть полного потока, можно приближенно оценить влияние потока рассеяния, приняв, что для трехфазных реакторов, входящих в состав электропечных агрегатов, падение напряжения, вызванное потоком рассеяния, составляет $\sim 10\%$ полного падения напряжения на обмотке реактора.

В трансформаторах, предназначенных для питания электрических печей, наибольшее распространение получили чередующиеся обмотки. Расчет реактивной составляющей $u_р$ для этих обмоток имеет свои особенности.

Симметричная чередующаяся обмотка каждого стержня разбивается на $n$ магнитно-уравновешенных подгрупп с равными н. с. в катушках ВН и НН одной подгруппы. Число подгрупп может быть различным от $n=2$ до $n=8 \div 10$. Чередующаяся несимметричная или не разбивающаяся на магнитно-уравновешенные группы обмотка применяется редко. Расчет $u_р$ для такой обмотки можно найти в [Л. 6].

Магнитное поле рассеяния для чередующейся обмотки является радиальным. Ось этого поля направлена перпендикулярно оси стержня сердечника. Примерная картина поля рассеяния и кривая распределения н. с. для симметричной чередующейся обмотки, состоящей из четырех магнитно-уравновешенных групп, показаны на рис. 5-12. Кривая распределения индукции в середине ширины обмотки в первом приближении может быть принята совпадающей с кривой распределения н. с.

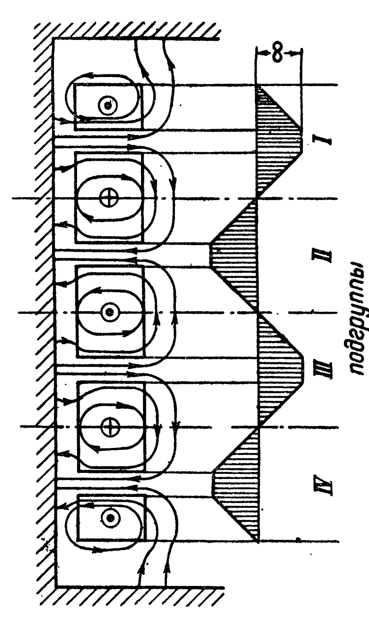



Рис. 5-12. Поле рассеяния симметричной чередующейся обмотки $n = 4$.

В чередующейся обмотке каждая магнитно-уравновешенная подгруппа может рассматриваться как пара самостоятельных обмоток, рассмотренных ранее. Поле рассеяния одной такой подгруппы (рис. 5-12) аналогично полю пары концентрических обмоток (рис. 5-10), и в этом случае также справедлива формула (5-25), если в нее подставить число витков и ток одной из обмоток (ВН или НН) подгруппы и заменить осевой размер концентрической обмотки $l$ радиальным размером чередующейся обмотки $l_р$.

Отдельные подгруппы чередующейся обмотки могут соединяться параллельно (обычно обмотки НН) или последовательно (обычно обмотки ВН). При параллельном соединении обмоток подгрупп число витков подгруппы равно числу витков на стержень $w$, а ток подгруппы равен $\frac{I_н}{n}$. При последовательном соединении число витков подгруппы равно $\frac{w}{n}$, а ток равен току обмотки одного стержня $I_н$.

В том и другом случаях формула (5-25) превращается в формулу

$$u_р = \frac{7{,}92 f w I_н \pi d_{12} \cdot a_р k_р}{n u_в l_р} 10^{-6} \ [\%], \qquad (5\text{-}29)$$

где $w$ — число витков обмотки стержня;

$I_н$ — ток этой обмотки;

$$a_р = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \ [см], \qquad (5\text{-}30)$$

где $a_1$, $a_2$, $a_{12}$, $d_{12}$, $l_р$ [см] определяются по рис. 5-13.

Часто обмотки выполняются с подразделением групп на катушки, разделенные горизонтальными масляными каналами (рис. 5-14). В этом случае распределение н. с.

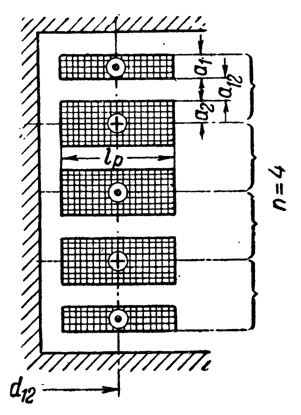


Рис. 5-13. К расчету $a_р$ для чередующейся обмотки.

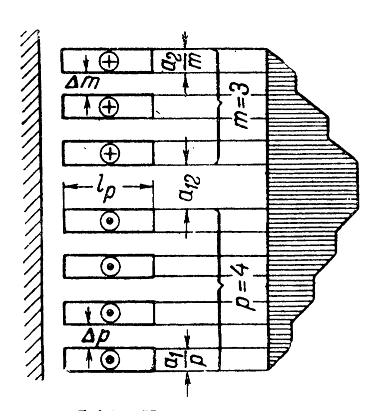


Рис. 5-14. К определению $a_р$ при разбивке чередующейся обмотки на катушки.

и индукции поля рассеяния изображается ступенчатой трапецией и для определения $a_р$ при разбивке одной из обмоток подгруппы на $p$, а другой на $m$ катушек следует пользоваться формулой

$$a_р = a_{12} + \Delta_p k_p + \Delta_m k_m + \frac{a_1 + a_2}{3}, \qquad (5\text{-}31)$$

где $a_1$ и $a_2$ представляют собой суммы осевых размеров катушек;

$\Delta_p$ и $\Delta_m$ — осевые размеры радиальных каналов;

коэффициенты $k_p$ и $k_m$ определяются по формулам:

$$k_p = \frac{(p-1)(2p-1)}{6p}; \qquad (5\text{-}32)$$

$$k_m = \frac{(m-1)(2m-1)}{6m} \qquad (5\text{-}33)$$

или по табл. 5-3.

Таблица 5-3

**Значения коэффициентов $k_p$ и $k_m$**

| $p$ (или $m$) | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $k_p$ (или $k_m$) | 0 | 0,111 | 0,25 | 0,4 | 0,556 | 0,714 | 0,875 |
| $p$ (или $m$) | 4,5 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 8,0 | 9,0 | 10,0 |
| $k_p$ (или $k_m$) | 1,035 | 1,2 | 1,53 | 1,86 | 2,19 | 2,52 | 2,85 |

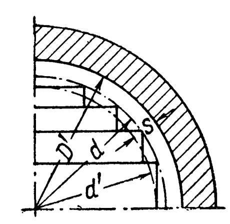



Рис. 5-15. К определению расстояния от обмотки до поверхности стержня.

Коэффициент $k_p$, учитывающий отклонение реального потока рассеяния от идеального параллельного потока, существенно изменяется с изменением осевого и радиального размеров обмоток и числа подгрупп обмотки. Значение $k_p$ может колебаться от $k_p = 0{,}2 \div 0{,}3$ при числе подгрупп $n = 2$ до $k_p = 0{,}8 \div 0{,}9$ при $n = 10 - 12$. Этот коэффициент зависит также от ширины канала между внутренней поверхностью обмотки и внешней поверхностью стержня сердечника. Для определения $k_р$ при чередующейся обмотке можно воспользоваться формулой

$$k_p = 1 - \sigma\left(1 - e^{-\frac{1}{\sigma}}\right)\left[1 - 0{,}5\, e^{-sk}\left(1 - e^{-\frac{1}{\sigma}}\right)\right], \qquad (5\text{-}34)$$

где $e$ — основание натуральных логарифмов;

$$\sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2 + \Sigma\Delta_p + \Sigma\Delta_m}{\pi l_р}; \qquad (5\text{-}35)$$

$$k = \frac{2\pi}{a_{12} + a_1 + a_2 + \Sigma\Delta_p + \Sigma\Delta_m}; \qquad (5\text{-}36)$$

или

$$k = \frac{2}{l_р \sigma}; \qquad (5\text{-}36')$$

$s$ [*см*] — расстояние от внутренней цилиндрической поверхности обмотки до внешней ступенчатой поверхности стержня сердечника. Для приближенного определения $s$ можно условно заменить ступенчатый стержень цилиндрическим стержнем равного объема. По рис. 5-15 нахо-

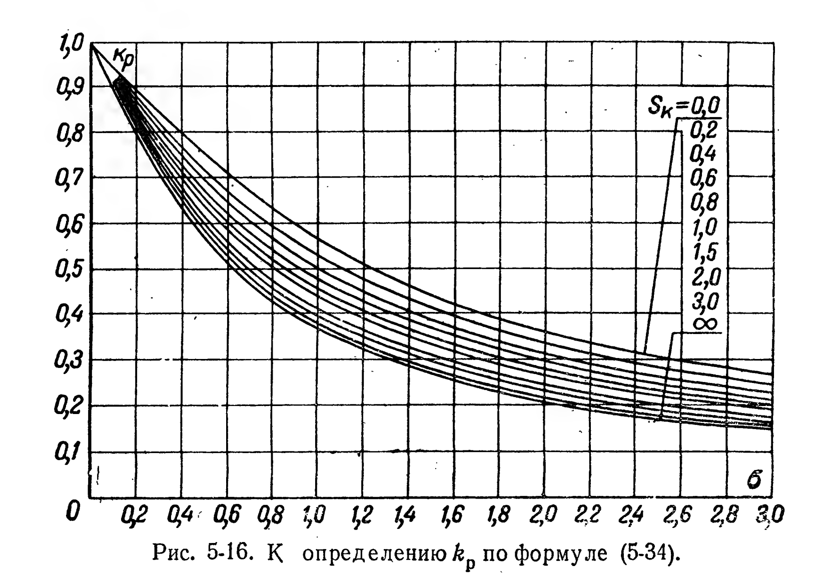



Рис. 5-16. К определению $k_р$ по формуле (5-34).

дим полное сечение действительного стержня $\frac{\pi d^2}{4} k_{кр}$ и фиктивного цилиндрического стержня $\frac{\pi (d')^2}{4}$. Приравнивая эти два сечения, получаем:

$$d' = k' \cdot d, \tag{5-37}$$

где $k' \approx \sqrt{k_{кр}}$ для разного числа ступеней стержня можно определить по табл. 5-4.

Таблица 5-4

**Значения $k'$ в формуле (5-37)**

| Число ступеней | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $s$ | 0,925 | 0,94 | 0,955 | 0,965 | 0,97 | 0,975 | 0,98 | 0,985 |

$k'$ может быть найдено как

$$s = \frac{D' - d'}{2} [см], \tag{5-38}$$

где $D'$ — внутренний диаметр обмотки.

Коэффициент $k_р$ может быть найден также по кривым на рис. 5-16, рассчитанным по формуле (5-34).

При определении активной составляющей напряжения короткого замыкания нормального силового или электропечного трансформатора обычно учитываются не только электрические потери в обмотках и отводах, но и потери, вызванные потоком рассеяния в этих и других частях трансформатора (отводах, стальных деталях, стенках бака и т. д.).

При определении реактивной составляющей напряжения короткого замыкания для нормального силового трансформатора обычно ограничиваются расчетом реактивного сопротивления обмоток и пренебрегают реактивным сопротивлением отводов. В электропечных трансформаторах отводы от обмоток НН до проходных изоляторов имеют обычно большое сечение и выполняются в виде системы параллельных шин. Реактивное сопротивление отводов НН в этих трансформаторах может оказаться соизмеримым с сопротивлением обмоток, и пренебрегать им можно не всегда.

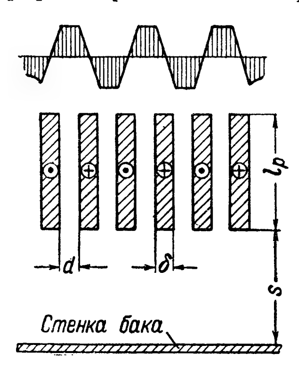


Рис. 5-17. К расчету реактивного сопротивления пакета шин.

Шинные отводы одной фазы электропечного трансформатора часто подразделяются на несколько параллельных шин. При этом рекомендуется в целях уменьшения потока рассеяния такого пакета чередовать в нем шины с прямым и обратным направлениями тока, располагать их широкими сторонами одну к другой так, как показано на рис. 5-17, выбирать ширину промежутка $d$ между шинами минимально возможной, а расстояние от шин до стенки бака $s$ не менее ширины шины $l_р$.

Уменьшения потока рассеяния отводов добиваются не только ради уменьшения их реактивного сопротивления, но и главным образом для того, чтобы уменьшить потери, возникающие в стенке бака и других стальных деталях трансформатора, через которые может замыкаться поток рассеяния (прессующие балки ярем, болты крепления отводов и т. п.). С этой точки зрения будет неправильным расположение параллельных шин в одной плоскости (рис. 5-18,*а*) или группирование шин с одинаковым направлением тока (рис. 5-18,*б*).

В трехфазных трансформаторах шины каждой фазы группируются так, как показано на рис. 5-17.

Расчет реактивного сопротивления отводов может быть проведен по методу, аналогичному методу расчета реактивного сопротивления чередующихся обмоток. При расположении комплекта шин по рис. 5-17 его можно рассматривать как комплект несимметричной чередующейся обмотки и применить для расчета сопротивления формулу [Л. 6] *

$$x_0 = \frac{7{,}9 f\left(d + \frac{\delta}{3}\right) k_p \cdot 10^{-8}}{l_p} \cdot \frac{n+1}{2n^2} \; [ом/см], \qquad (5\text{-}39)$$

где $d$, $\delta$ и $l_p$ [*см*] — по рис. 5-17;

$n$ равно числу шин с током одного знака (на рис. 5-17 $n = 3$);

$k_p$ определяется по формуле (5-34) или рис. 5-16; при $\sigma = \frac{d+\delta}{\pi l_p}$, $k = \frac{2\pi}{d+\delta}$ и $s$ [*см*], равном расстоянию от шины до стенки бака.

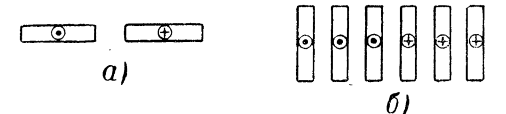



Рис. 5-18. Неправильное расположение и группировка шин отводов.

Величина $x_0$, полученная по формуле (5-39), выражена в *ом/см* длины пакета отводов. Если расстояния между шинами в пакете отводов неодинаковы по длине пакета, то пакет шин разбивается по длине на несколько участков, в пределах которых расстояния неизменны, и общее реактивное сопротивление отводов одной фазы $x_{от}$ определяется как сумма сопротивлений участков:

$$x_{от} = \Sigma [l x_0] \; [ом]. \qquad (5\text{-}40)$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора с учетом индуктивности отводов может быть выражена так:

$$u_p = u_{р.обм} + u_{р.от}, \qquad (5\text{-}41)$$

* Этот расчет, но без учета близости стенки бака, может быть проведен также по методу, изложенному в [Л. 7].

где $u_{\text{р.обм}}$ определяется только для обмоток по формуле (5-29), (5-25) или (5-26):

$$u_{\text{р.от}} = \frac{x_{\text{от}} I_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} 100 \ [\%]. \tag{5-42}$$

После определения активной и реактивной составляющих напряжение короткого замыкания трансформатора может быть определено по формуле

$$u_{\text{к}} = \sqrt{u_{\text{а}}^2 + u_{\text{р}}^2}. \tag{5-43}$$

Расчет напряжения короткого замыкания производится после того, как раскладка и расчет обмоток закончены и обмотки получили определенные форму и размеры. Поэтому расчет $u_{\text{к}}$ является поверочным, однако напряжение короткого замыкания, полученное в результате этого расчета, должно совпадать с величиной $u_{\text{к}}$, регламентированной ГОСТ или заданной в технических условиях.

Напряжение короткого замыкания готового нормального силового трансформатора согласно ГОСТ 401-41 может отличаться от гарантийной величины не более чем на $\pm 10\%$. Для электропечных трансформаторов техническими условиями обычно устанавливается такой же или несколько больший допуск.

При изготовлении трансформатора вследствие возможных отклонений в размерах обмоток (в частности, в размерах $a_1$, $a_2$ и $a_{12}$), лежащих в пределах нормальных производственных допусков, а также вследствие неточности методов расчета $u_{\text{к}}$ готового трансформатора может получиться отличающимся от расчетной величины. Для того чтобы у готового трансформатора отклонение $u_{\text{к}}$ от гарантийной величины не выходило за пределы допуска, рекомендуется при расчете трансформатора допускать отклонения в расчетной величине напряжения короткого замыкания от гарантийного значения не больше чем на половину допуска, т. е. не более чем на $\pm 5\%$ для нормальных силовых и на столько же или несколько более—для электропечных трансформаторов.

В тех случаях, когда полученное $u_{\text{к}}$ отклоняется от гарантийного значения на бóльшую величину, следует произвести пересчет обмоток. Изменение $u_{\text{к}}$ в нужном направлении лучше всего вести за счет изменения его реактивной

составляющей. Небольших изменений $u_р$ [формулы (5-25), (5-26) и (5-31)] можно достигнуть, изменяя $a_р$ за счет изменения $a_{12}$. Более резкое изменение $u_р$ достигается изменением э. д. с. одного витка $u_в$ и числа витков.

## 5-3. РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ СИЛ В ОБМОТКАХ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Процесс короткого замыкания нормального силового трансформатора является аварийным режимом и сопровождается многократным (до 15—20 раз) увеличением токов в обмотках по сравнению с их номинальными токами.

Столь большое увеличение тока при коротком замыкании вызывает увеличение потерь и нагрева обмоток. Ввиду того, что процесс короткого замыкания ограничивается по времени 3—5 *сек*, его можно рассматривать как процесс, происходящий без отдачи тепла в окружающую среду, и считать, что все тепло, выделяющееся в обмотках, будет в них накапливаться, создавая опасное для изоляции быстрое увеличение их температуры. Принято рассчитывать обмотки так, чтобы их температура к моменту ликвидации короткого замыкания не превосходила 250° С.

Наибольшую опасность представляют для обмоток трансформатора те механические силы, которые при коротком замыкании возникают между обмотками и их частями. Эти силы возникают также и при нормальных рабочих токах, но, будучи пропорциональны квадрату тока, они достигают опасных для трансфоматора величин лишь при токах короткого замыкания. Их необходимо учитывать при расчете и конструировании трансформатора, в противном случае они могут привести к разрушению обмотки—разрыву витков или разрушению опорных конструкций.

В трансформаторах, предназначенных для питания дуговых электрических печей, короткие замыкания (на электродах печи) происходят достаточно часто. Их число в течение одного периода плавки, продолжающегося 3—6 *ч*, достигает 100 и более. Эти короткие замыкания ликвидируются обычно защитой путем управления электродами печи без отключения трансформатора от сети. Число отключений трансформатора за период плавки, как правило. не превышает 1—3.

Величина возможного тока короткого замыкания ограничивается сопротивлением всей электропечной установки, включая реактор, трансформатор и короткую сеть. Общее

сопротивление этих элементов установки выдерживается таким, чтобы ток короткого замыкания установки не превосходил номинальный ток более чем в 2,5—4 раза. Длительность коротких замыканий при токах, в 2,5—3 раза бо́льших номинального, ограничивается защитой в пределах 5—3 *сек*. Одиночное короткое замыкание для электропечного трансформатора, таким образом, оказывается значительно облегченным по сравнению с коротким замыканием для нормального силового трансформатора, однако весьма большая частота этих коротких замыканий заставляет проявить особое внимание к вопросу прочности при расчете и конструировании обмоток электропечного трансформатора и их крепления.

Расчет обмоток на нагрев и механическую прочность при коротком замыкании является поверочным расчетом и включает:

1) определение максимального значения тока короткого замыкания трансформатора;

2) определение температуры обмотки при коротком замыкании;

3) определение механических сил между обмотками и их частями;

4) определение механических напряжений в проводах обмоток, изоляционных опорных и междукатушечных конструкциях.

Ток короткого замыкания электропечного трансформатора обычно рассчитывается для случая короткого замыкания на электродах печи с учетом реактивного сопротивления всей установки, т. е. трансформатора, реактора и короткой сети. Возможность случайного полного короткого замыкания на зажимах НН трансформатора, представляющих собой ряд шин большого сечения, практически исключена.

Действующее значение установившегося тока короткого замыкания определяется по формуле

$$I_{\text{ку}} = I_{\text{н}} \frac{100}{u_{\text{к}}} \; [a], \qquad (5\text{-}44)$$

где $I_{\text{н}}$ — номинальный ток соответствующей обмотки, катушки или витка.

При определении $I_{\text{ку}}$ по формуле (5-45) следует подставлять напряжение короткого замыкания $u_{\text{к}}$ всей уста-

новки. Если эта величина неизвестна, то для определения $I_{ку}$ следует пользоваться формулой

$$I_{ку} \approx 4I_{н}. \qquad (5\text{-}44')$$

В начальный момент значение тока короткого замыкания вследствие наличия апериодической составляющей может значительно превысить установившийся ток и вызвать механические силы между обмотками, превышающие в несколько раз силы при установившемся токе короткого замыкания. Согласно общей теории трансформаторов это мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания определяется по формуле

$$i_{км} = 1{,}41 k_{м} I_{ку} \; [a], \qquad (5\text{-}45)$$

где $k_{м}$ — коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую тока короткого замыкания, определяемый по формуле

$$k_{м} = 1 + e^{-\frac{\pi u_{а}}{u_{р}}}. \qquad (5\text{-}46)$$

При расчете температуры обмоток при коротком замыкании полагают, что вследствие кратковременности процесса можно не учитывать теплоотдачи от обмотки к маслу и считать, что все тепло, выделяющееся в обмотке, накапливается, повышая ее температуру. Тогда температуру обмотки $\vartheta_{к}$ через $t$ *сек* после возникновения короткого замыкания можно определить по формуле

$$\vartheta_{к} = \frac{670 t_{к}}{12{,}5\left(\frac{u_{к}}{\Delta}\right)^{2} - t_{к}} + \vartheta_{н} [°C], \qquad (5\text{-}47)$$

где $\vartheta_{н}$ — температура обмотки до короткого замыкания; обычно принимается $\vartheta_{н} = 90°$ C; $\Delta$ — плотность тока в обмотке при номинальном токе $[a/мм]^2$; $u_{к}$ [%] — напряжение короткого замыкания установки; если оно неизвестно, то следует принять $u_{к} = 25\%$.

Время, в течение которого температура обмоток при $\vartheta_{н} = 90°$ C достигает 250° C, равно:

$$t_{к250} \approx 2{,}5\left(\frac{u_{к}}{\Delta}\right)^{2} [сек]. \qquad (5\text{-}48)$$

Для электропечных трансформаторов, у которых $u_{к} \geqslant 25\%$, значение $t_{к250}$ достигает нескольких десятков секунд. Таким

образом, при выдержках времени защиты 3—5 *сек* температура обмоток этих трансформаторов при коротком замыкании оказывается значительно ниже 250° С.

Механические силы возникают в результате взаимодействия тока в обмотке с магнитным полем рассеяния. Расчет сил, так же как и расчет потоков рассеяния, представляет весьма сложную задачу. Эта задача еще усложняется тем, что обмотки трансформатора не являются монолитными в механическом отношении. Конструктивно каждая обмотка трансформатора состоит из медных проводников, разделенных витковой изоляцией в виде оплетки из кабельной бумаги или пряжи и в некоторых случаях междуслойной изоляцией—прослойками из кабельной бумаги или картона. Между катушками, а в некоторых обмотках и между витками размещаются прокладки, набранные из электроизоляционного картона.

Механические силы, возникающие при коротком замыкании, неравномерно распределяются между витками обмотки. Суммируясь, они создают силы, действующие на междукатушечную и опорную изоляцию обмоток, на рейки, образующие вертикальные каналы, и изоляционные цилиндры. Поскольку максимальные механические силы при коротком замыкании действуют в течение очень короткого промежутка времени, упругость витковой и междукатушечной изоляции может существенно повлиять на суммарные силы и их максимальное значение может оказаться несколько меньшим, чем арифметическая сумма элементарных сил. С другой стороны, упругость изоляции облегчает возникновение собственных механических колебаний проводов обмотки, что может привести к увеличению механических напряжений и способствовать разрушению обмоток.

Для упрощения задачи определение механических сил обычно производится для условной, монолитной в механическом отношении обмотки без учета внутренней упругости ее изоляции. Некоторые упрощения допускаются также и при определении потоков рассеяния трансформатора. Таким образом, механические силы, которые обычно определяются при расчете, являются в известной мере условными, однако расчет этих сил позволяет практически правильно оценить механическую прочность трансформатора при коротком замыкании.

Поле рассеяния для наиболее часто применяемых в электропечных трансформаторах чередующихся обмоток примерно показано на рис. 5-12. При рассмотрении этого

поля приходится считаться с тем, что индукционные линии поля не являются радиально направленными прямыми, а изгибаются вниз или вверх, приближаясь к левому и правому краям поперечного сечения обмотки. Это поле рассеяния можно разложить на два взаимно-перпендикулярных поля: радиальное, индукционные линии которого направлены радиально вдоль канала рассеяния, и осевое, линии которого направлены по оси обмотки перпендикулярно каналу рассеяния. Распределение индукции того и другого полей для одной магнитно-уравновешенной группы показано на рис. 5-19. Индукция осевого поля для чередующейся обмотки обычно значительно меньше, чем радиального. Осевое поле уменьшается с увеличением радиального размера обмотки и увеличивается с его уменьшением.

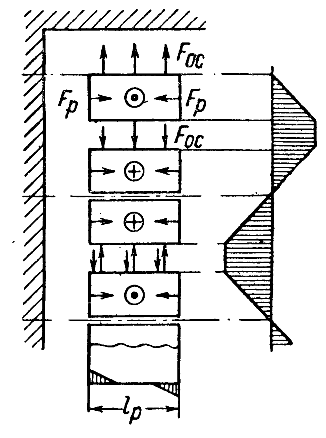



**Рис. 5-19.** Распределение индукции поля рассеяния и механические силы для одной группы чередующейся обмотки.

Радиальное и осевое поля рассеяния, взаимодействуя с токами обмоток, создают механические силы, действующие на обмотки. Радиальное поле рассеяния создает осевые силы $F_{\text{ос}}$, которые в каждой магнитно-уравновешенной группе стремятся удалить друг от друга обмотки с токами разных направлений. Осевое поле создает силы $F_{\text{р}}$, направленные радиально и стремящиеся сжать все катушки обмотки.

Согласно общей теории трансформаторов осевая сила $F_{\text{ос}}$, действующая на одну из обмоток каждой подгруппы, может быть найдена из выражения

$$F_{\text{ос}} = \frac{6{,}4\,(i'_{\text{км}} w_{\text{пгр}})^2 l_{\text{в}} k_{\text{р}}}{l_{\text{р}}} 10^{-8} \; [\text{кг}], \qquad (5\text{-}49)$$

где $i'_{\text{км}}$ — мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания одной из обмоток в одной подгруппе;

$w_{\text{пгр}}$ — число витков в одной подгруппе той же обмотки.

При параллельном соединении различных подгрупп обмотки при числе подгрупп, равном $n$, $w_{\text{пгр}} = w$ — полному числу витков данной обмотки на одном стержне, а ток $i'_{\text{км}}$ в $n$ раз меньше тока на один стержень: $i'_{\text{км}} = \frac{i_{\text{км}}}{n}$. При по-

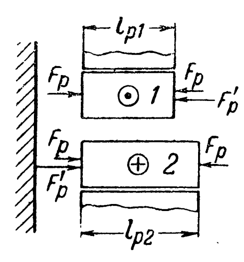



Рис. 5-20. Возникновение дополнительных радиальных сил $F'_{\text{р}}$ при неравенстве размеров $l_{1\text{р}}$ и $l_{2\text{р}}$.

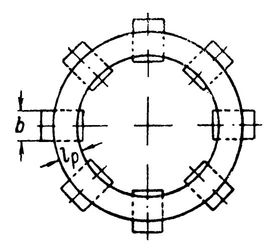



Рис. 5-21. К определению сжимающих напряжений в междукатушечной изоляции.

следовательном соединении $w_{\text{пгр}} = \frac{w}{n}$; $i'_{\text{км}} = i_{\text{км}}$. В том и другом случаях осевая сила $F_{\text{ос}}$ следующим образом выражается через ток $i_{\text{км}}$ и число витков $w$ полной обмотки одного стержня:

$$F_{\text{ос}} = \frac{6{,}4\,(i_{\text{км}} w)^2\, l_{\text{в}} k_{\text{р}}}{n^2 l_{\text{р}}}\, 10^{-8}\ [\textit{кг}], \tag{5-50}$$

где $l_{\text{в}}$ — средняя длина витка обмотки [*см*];
$k_{\text{р}}$ определяется по формуле (5-34);
$l_{\text{р}}$ [*см*] — по рис. 5-19.

Радиальные усилия $F_{\text{р}}$, сжимающие обмотку в направлении канала рассеяния в том случае, когда радиальный размер для обеих обмоток одинаков, обычно бывают малы и не подсчитываются. Если радиальные размеры обмоток $l_{1\text{р}}$ и $l_{2\text{р}}$ (рис. 5-20) не равны, то возникает дополнительное осевое поле, вызывающее появление сил $F'_{\text{р}}$, которые стремятся так сдвинуть обмотки, чтобы увеличить несимметрию в их расположении. В случае, показанном на рис. 5-20, дополнительные силы $F'_{\text{р}}$ сжимают обмотку *1* и растягивают витки обмотки *2*. При значительном различии в ра-

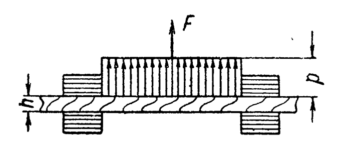
диальных размерах обмоток силы $F'_р$ могут достигать значений, опасных для прочности обмоток. Поэтому при расчете обмоток не следует допускать разницу в размерах $l_{1р}$ и $l_{2р}$ более 10%.

Осевая сила $F_{ос}$, определенная по формуле (5-50), действует на одну из обмоток каждой подгруппы в чередующейся обмотке. Эта сила воспринимается междукатушечной изоляцией в средних подгруппах и ярмовой изоляцией под действием крайних обмоток верхней и нижней подгрупп. По этой силе определяется напряжение сжатия на междукатушечных прокладках по формуле

$$\sigma_{сж} = \frac{F_{ос}}{n l_р b} \ [кг/см^2], \tag{5-51}$$

где $n$ — число прокладок по окружности обмотки (рис. 5-21);
$l_р$ — радиальный размер обмотки, *см*;
$b$ — ширина прокладки, *см* (обычно $b = 4 \div 5$ *см*).

Величина сжимающего напряжения на междукатушечных прокладках из электроизоляционного картона $\sigma_{сж}$, определенная по формуле (5-51), должна удовлетворять неравенству $\sigma_{сж} \leqslant 180 \div 200$ *кг/см²*.



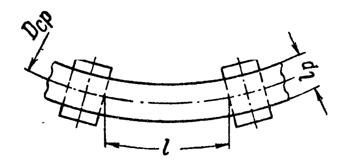




Рис. 5-22. К определению напряжений при изгибе провода.

Осевая сила $F_{ос}$, действуя на отдельные катушки или витки каждой из обмоток, изгибает их. При этом каждую катушку или виток, так же как и каждый провод в них, можно рассматривать как балку, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой, свободно лежащую на двух опорах с пролетом $l$, равным расстоянию между двумя соседними междукатушечными прокладками (рис. 5-22). Наибольшее усилие $F$ будет действовать на катушку (виток), ближайшую к каналу рассеяния. Это усилие $F$, отнесенное к одному пролету между прокладками, можно определить по формуле

$$F = \frac{F_{ос} \frac{2m - 1}{m^2}}{n} \ [кг]. \tag{5-52}$$

где $m$ — число катушек (витков в винтовой обмотке) в одной подгруппе обмотки;

$n$ — число прокладок или реек по окружности обмотки.

Максимальный изгибающий момент в пролете между двумя прокладками

$$M_{\text{макс}} = \frac{Fl}{12}\ [\textit{кг}\cdot\textit{см}], \tag{5-53}$$

где

$$l = \frac{\pi D_{\text{ср}}}{n} - b\ [\textit{см}].$$

Максимальное напряжение на изгиб

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M_{\text{макс}}}{W}\ [\textit{кг/см}^2]. \tag{5-54}$$

где $W$ — момент сопротивления катушки (витка), равный:

$$W = \frac{w_{\text{к}} a h^2}{6}\ [\textit{см}^3]; \tag{5-55}$$

$w_{\text{к}}$ — число проводов в катушке; $a$ — радиальный и $h$ — осевой размеры провода, *см*.

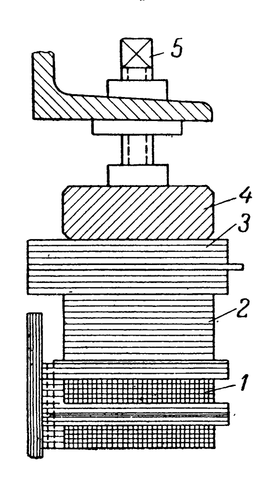



Рис. 5-23. Усиление прессовки обмоток.

*1* — обмотка; *2* — опорное кольцо, склеенное из электрокартонных шайб; *3* — ярмовая изоляция (электрокартон); *4* — стальное разрезное прессующее кольцо; *5* — прессующий винт.

Полученное значение не должно быть больше 550 *кг/см²*. Если $\sigma_{\text{и}} > 550$ *кг/см²*, то следует увеличить число прокладок по окружности обмотки и уменьшить $l$.

Концентрическое расположение обмоток НН и ВН чрезвычайно редко применяется в электропечных трансформаторах. В случае применения такой обмотки расчет механических сил в обмотках может быть произведен по [Л. 3].

При определении механических сил в чередующихся обмотках электропечных трансформаторов механические напряжения в опорной и междукатушечной изоляции часто оказываются значительно ниже допустимой величины 180—200 *кг/см²*. Тем не менее частое повторение коротких замыканий при нормальном режиме работы трансформатора с печью заставляет и в этих случаях принимать специальные меры для повышения механической прочности

обмоток. Эти меры обычно направляются на улучшение прессовки обмоток с целью придания им большей механической монолитности. Этой цели служат: пропитка обмоток глифталевым лаком, применение в опорной изоляции колец, склеенных из электрокартонных шайб, применение для осевой опрессовки обмоток стальных нажимных колец. Нажимные кольца накладываются поверх верхней опорной изоляции обмоток, и осевая подпрессовка обмоток осуществляется специальными винтами, проходящими через полки верхней ярмовой балки (рис. 5-23). Во избежание образования короткозамкнутого витка стальное кольцо делается разрезным — с одним поперечным разрезом. Подпрессовка обмоток особенно необходима в первое время после ввода трансформатора в эксплуатацию, пока междукатушечная и опорная изоляция еще получает остаточные деформации. Для увеличения механической прочности обмоток иногда применяется также соединение междукатушечных прокладок внешней рейкой (рис. 5-24).

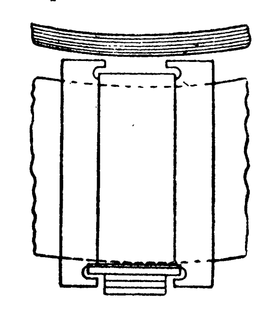


Рис. 5-24. Укрепление междукатушечных прокладок внешней рейкой.

*ГЛАВА ШЕСТАЯ*

# РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСФОРМАТОРА

## 6-1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ СЕРДЕЧНИКА

Окончательный расчет магнитной системы обычно проводится после того, как установлены размеры обмоток трансформатора и главных изоляционных промежутков и проверены характеристики короткого замыкания. При окончательном расчете определяются: размеры пакетов стержня и ярма, число листов стали в них, расположение охлаждающих каналов, активные сечения стержня и ярма, индукция в стержне и ярме, высота стержня, расстояние между осями стержней, вес стержней и ярем и полный вес стали в трансформаторе. После окончательного определения всех этих величин рассчитываются потери и ток холостого хода.

Расчет магнитной системы электропечного трансформатора ничем не отличается от расчета магнитной системы

нормального силового трансформатора. Поэтому в настоящей главе даются сведения, лишь минимально необходимые для проведения расчета. Более подробные данные можно найти в [Л. 3 и 4].

Размеры пакетов стержня выбираются так, чтобы площадь поперечного сечения (ступенчатой фигуры) стержня была максимально возможной. Оптимальные размеры ширины пакетов *a* приведены на рис. 6-1.

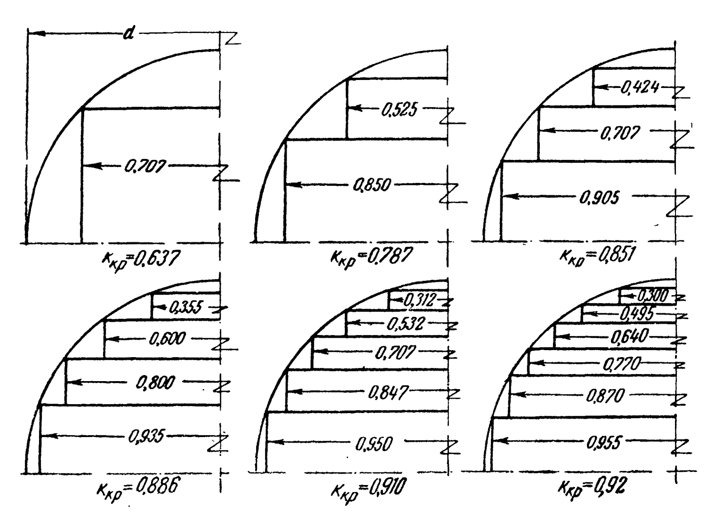



Рис. 6-1. Размеры пакетов стержня, обеспечивающие максимальное заполнение площади круга площадью ступенчатой фигуры ($d = 1{,}000$).

Раскрой листов стали для сердечника следует вести так, чтобы направление магнитного потока в стержнях и ярмах совпадало с направлением прокатки листа. Для этого длина пластин сердечника должна всегда располагаться вдоль большого размера, т. е. длины листа, а их ширина — по ширине стандартного листа. Для листов со стандартной шириной 750 *мм*, уменьшающейся после обрезки кромок до 735 *мм*, наименьший процент неиспользуемых отходов дают пластины сердечника с шириной: 49, 52, 56, 61, 66, 73, 81, 92, 105, 122, 147, 184, 245 и 368 *мм*. Этим размерам обычно отдают предпочтение при определении ширины пакетов *a*, даже если это приводит к некоторому уменьшению коэффициента заполнения. Размер *a* обычно округляют до 0,1 *см*.

Толщина пакетов $b$ определяется из условия симметрии ступенчатой фигуры по отношению к ее главным осям и осям, проведенным под углом 45° к направлению главных осей, или из прямоугольных треугольников, образуемых половиной ширины пакета и радиусом окружности (рис. 6-2). Размер $b$ обычно округляется до 0,05 *см*.

При прессовке стержня шпильками между окружностью стержня и поверхностью его крайнего пакета должно быть предусмотрено достаточное место для размещения деталей стяжки (см. рис. 2-8). Соответствующий размер — высота сегмента $e$ — может быть взят по табл. 6-1. Оптимальные размеры пакетов в этом случае определяются путем подбора с учетом размещения охлаждающих каналов.

Таблица 6-1

**Размер сегмента *e*, *см***

| Диаметр стержня, *см* | Размер *e*, *см* |
|---|---|
| 25—35 | 1,2 |
| 35—45 | 1,6 |
| 45—55 | 2,2—2,5 |
| 55—75 | 3,0—3,5 |

В стержнях с диаметром до 35 *см* охлаждающих каналов обычно не делают. В стержнях с бóльшим диаметром каналы располагаются так, чтобы общая толщина пакетов между двумя каналами не превышала 8,5—10 *см*, а между крайним каналом и наружной поверхностью стержня — 10—12 *см*.

Размеры пакетов, окончательно установленные для сердечника, рекомендуется проверить на эскизе в масштабе 1 : 1 или 1 : 2.

Полное сечение стержня определяется по формуле

$$П_{фс} = \Sigma П_{п} \ [см]^2, \qquad (6\text{-}1)$$

где $П_{п}$ — сечение отдельных пакетов;

активное сечение

$$П_{с} = k_{з} П_{фс} \ [см^2]. \qquad (6\text{-}2)$$

Для упрощения конструкции и сборки трансформатора сечение ярма обычно выполняют с меньшим числом ступеней, чем стержень, или делают ярмо прямоугольного сечения (рис. 2-7). В последнем случае считаются с некоторым увеличением потерь и тока холостого хода или прибегают к их уменьшению за счет увеличения сечения ярма и уменьшения индукции в нем. Коэффициент усиления ярма принимают обычно равным $k_{я} = 1{,}0$ при ступенчатом сечении ярма и 1,00—1,15 — для ярма прямоугольной формы.

Полное сечение ярма предварительно определяется по формуле

$$П_{фя} = k_я П_{фс} \ [см^2]. \qquad (6\text{-}3)$$

Ширина ярма $b_я$ определяется по рис. 6-2. $b_я = \Sigma b_п$ $[см]$ для стержня без охлаждающих каналов; $b_я = \Sigma b_п + n_к b_к$ $[см]$

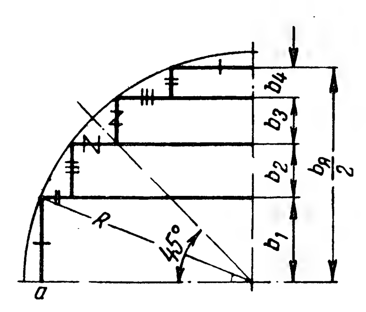



Рис. 6-2. К определению толщины пакетов стержня.

Рис. 6-3. К определению размеров сердечника.

для стержня с $n_к$ охлаждающими каналами шириной $b_к$ $[см]$ каждый.

Высота ярма $h_я$ (см. рис. 6-3) при прямоугольном сечении для сердечника без каналов

$$h_я = \frac{П_{фя}}{b_я} \ [см]; \qquad (6\text{-}4)$$

для сердечника с $n_к$ каналами

$$h_я = \frac{П_{фя}}{b_я - n_к b_к} \ [см]. \qquad (6\text{-}5)$$

Значения $h_я$ могут округляться до 0,1 *см*. Окончательное полное сечение ярма определяется по формуле

$$П_{фя} = h_я \Sigma b_п \ [см^2], \qquad (6\text{-}6)$$

а активное сечение

$$П_я = k_з П_{фя} \ [см]^2. \qquad (6\text{-}7)$$

Для ярма, имеющего ступенчатую форму, определение полного и активного сечений ведется аналогично предыду-

щему с учетом различной высоты отдельных пакетов (ступеней).

После расчета действительных активных сечений стержня и ярма производится уточнение индукции при соединении обмоток ВН электропечного трансформатора в треугольник:

в стержне

$$B_{с}=\frac{u_{в}\cdot 10^{8}}{4{,}44 f \Pi_{с}}\ [гс];\qquad (6\text{-}8)$$

в ярме

$$B_{я}=B_{с}\frac{\Pi_{с}}{\Pi_{я}}\ [гс].\qquad (6\text{-}9)$$

При соединении обмоток ВН электропечного трансформатора в звезду при неизменном линейном напряжении питающей сети индукция в стержне и ярме уменьшается в $\sqrt{3}$ раз.

Число листов стали в отдельных пакетах стержня и ярма рассчитывается по формуле

$$n_{л}=\frac{b_{п}k_{з}}{\delta_{ст}},\qquad (6\text{-}10)$$

где $\delta_{ст}$ — толщина листов стали, *см*;

$k_{з}$ — коэффициент заполнения пакета сталью (см. табл. 2-6).

Длина стержня определяется по формуле

$$l_{с}=l+l_{0}'+l_{0}''\ [см],\qquad (6\text{-}11)$$

$l$, $l_{0}'$ $l_{0}''$ — по рис. 6-3 обычно $l_{0}'=l_{0}''$ и определяется по табл. 3-2.

Расстояние между осями соседних стержней

$$C=D_{1}''+a_{22}\ [см],\qquad (6\text{-}12)$$

где $D''$ — внешний диаметр обмотки ВН; $a_{22}$ — расстояние между обмотками ВН соседних стержней, определяемое по табл. 3-2. $C$ чаще всего округляется до 0,5 *см*.

Вес стали в стержнях

$$G_{с}=c\Pi_{с}l_{с}7{,}6\cdot 10^{-3}\ [кг],\qquad (6\text{-}13)$$

где $c$ — число активных стержней; 7,6 — удельный вес трансформаторной стали, *кг/дм³*; $\Pi_{с}$ — [$см^2$]; $l_{с}$ — [*см*].

Вес частей ярем, заключенных между осями крайних стержней,

$$G'_я = 2(c-1)CП_я 7{,}6\cdot 10^{-3} = 15{,}2(c-1)CП_я\cdot 10^{-3}\,[кг]. \tag{6-14}$$

Вес частей ярем, заштрихованных на рис. 6-3, для ярма прямоугольной формы

$$G''_я = 4\frac{П_с}{2}h_я 7{,}6\cdot 10^{-3} = 15{,}2П_с h_я\cdot 10^{-3}\,[кг]. \tag{6-15}$$

Для ярма ступенчатой формы подсчет $G''_я$ производится раздельно по пакетам.

Полный вес двух ярем

$$G_я = G'_я + G''_я\,[кг]. \tag{6-16}$$

Полный вес стали трансформатора

$$G_{ст} = G_с + G_я\,[кг]. \tag{6-17}$$

## 6-2. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ И ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Потери холостого хода электропечного трансформатора $P_х$ состоят из потерь в активном материале (стали) сердечника и потерь в стальных элементах конструкции остова трансформатора, вызванных частичным ответвлением главного магнитного потока. Электрическими потерями в первичной обмотке, вызванными током холостого хода и диэлектрическими потерями в изоляции, обычно пренебрегают.

При заданной частоте и равномерном распределении индукции потери в единице объема стали определенной марки однозначно определяются индукцией. Эту зависимость, экспериментально определяемую для любой марки стали, представляют в форме потерь, отнесенных к единице веса (1 *кг*) стали $p$, и обычно выражают в виде таблицы или кривой удельных потерь $p = F(B)$.

Величина потерь холостого хода трансформатора определяется весом стали отдельных участков сердечника, магнитной индукцией на каждом из этих участков, качеством стали и толщиной ее листов. Неравномерное распределение индукции по сечению стержня и ярма, изменение струк-

туры стали при механической обработке — резании, штамповке, шлифовании, наличие потерь в элементах конструкции — стяжных шпильках, прессующих балках ярем и др., а также в междулистовой лаковой изоляции, местное увеличение индукции на стыках сердечников, собираемых в переплет, вызывают добавочные потери, точный учет которых возможен далеко не всегда.

При расчете потерь холостого хода сердечник трансформатора обычно разделяют на две части: стержни и ярма, считая, что каждая из них имеет свою, вполне определенную среднюю индукцию. Добавочные потери оцениваются приближенно путем введения постоянного коэффициента в общей сумме потерь в стержнях и ярмах.

Таким образом, потери холостого хода могут быть определены по формуле

$$P_{х} = k_{д} (p_{с} G_{с} + p_{я} G_{я}) [\mathit{вт}], \tag{6-18}$$

где $p_{с}$ и $p_{я}$ — удельные потери в 1 *кг* стали стержня и ярма, зависящие от индукции ($B_{с}$ и $B_{я}$), марки и толщины листов стали;

$k_{д}$ — коэффициент добавочных потерь.

Значения $p$ для различных индукций и марок стали горячей и холодной прокатки могут быть взяты из табл. 6-2 и 6-3. При этом предполагается, что добавочные потери, возникающие в холоднокатаной стали вследствие наклепа при механической обработке заготовок листов для сердечника (резке, штамповке, шлифовке), должны быть сняты путем отжига заготовок после механической обработки. Для трансформаторов с диаметром стержня до 20 *см* включительно коэффициент добавочных потерь в формуле (6-18) можно принять равным 1,00—1,02. При диаметрах стержня $20 < d < 60$ *см* следует принимать $k_{д} = 1{,}03 \div 1{,}15$.

Действительные потери холостого хода, измеренные в готовом трансформаторе, вследствие нестабильности качества стали, допустимых отклонений в размерах трансформатора и технологии его изготовления, неравномерности распределения индукции и других причин могут несколько отличаться от расчетных потерь холостого хода. Поэтому при расчете потерь холостого хода стремятся выдержать их в пределах заданной нормы, не превышая ее более чем на половину положительного допуска, разрешенного техническими условиями на трансформатор. Так, например, если заданы потери холостого хода $p_{х}$ и допускается для гото-

Таблица 6-2

**Удельные потери в стали марки Э41 при $f = 50$ *гц*, $p$ [*вт/кг*]**

| *B, гс* | Э41-0,35 *вт/кг* | Э41-0,5 *вт/кг* | *B, гс* | Э41-0,35 *вт/кг* | Э41-0,5 *вт/кг* |
|---|---|---|---|---|---|
| 6 000 | 0,580 | 0,675 | 10 600 | 1,49 | 1,81 |
| 6 200 | 0,590 | 0,700 | 10 800 | 1,55 | 1,86 |
| 6 400 | 0,600 | 0,740 | 11 000 | 1,61 | 1,92 |
| 6 600 | 0,620 | 0,785 | 11 200 | 1,68 | 1,99 |
| 6 800 | 0,650 | 0,835 | 11 400 | 1,75 | 2,05 |
| 7 000 | 0,685 | 0,890 | 11 600 | 1,82 | 2,11 |
| 7 200 | 0,720 | 0,920 | 11 800 | 1,88 | 2,18 |
| 7 400 | 0,750 | 0,980 | 12 000 | 1,94 | 2,24 |
| 7 600 | 0,790 | 1,03 | 12 200 | 2,01 | 2,30 |
| 7 800 | 0,820 | 1,08 | 12 400 | 2,09 | 2,38 |
| 8 000 | 0,855 | 1,13 | 12 600 | 2,17 | 2,44 |
| 8 200 | 0,900 | 1,18 | 12 800 | 2,25 | 2,51 |
| 8 400 | 0,935 | 1,22 | 13 000 | 2,31 | 2,58 |
| 8 600 | 0,975 | 1,28 | 13 200 | 2,38 | 2,65 |
| 8 800 | 1,01 | 1,32 | 13 400 | 2,44 | 2,71 |
| 9 000 | 1,05 | 1,38 | 13 600 | 2,51 | 2,78 |
| 9 200 | 1,11 | 1,43 | 13 800 | 2,58 | 2,86 |
| 9 400 | 1,16 | 1,49 | 14 000 | 2,66 | 2,95 |
| 9 600 | 1,20 | 1,53 | 14 200 | 2,72 | 3,02 |
| 9 800 | 1,26 | 1,59 | 14 400 | 2,80 | 3,11 |
| 10 000 | 1,30 | 1,64 | 14 600 | 2,87 | 3,21 |
| 10 200 | 1,36 | 1,70 | 14 800 | 2,94 | 3,31 |
| 10 400 | 1,43 | 1,76 | 15 000 | 3,00 | 3,40 |

Примечание. Для стали марки Э42 значения удельных потерь для Э41-0,5 надо умножить на коэффициент 0,92 для Э42-0,5 и 0,78 — для Э42-0,35.

вого трансформатора превышение этих потерь на 15%, то предельно допустимое при расчете значение потерь не должно превышать 1,075 $P_x$.

Удельные потери $p$ в 1 *кг* холоднокатаной стали, приведенные для различных индукций в табл. 6-3, справедливы лишь для случая, когда направление магнитного потока совпадает с направлением прокатки стали. При отклонении магнитного потока от направления прокатки, например в местах сопряжения стержня с ярмом в сердечниках, собранных из прямоугольных листов (заштрихованные части на рис. 6-4,*а* и *в*), в этих

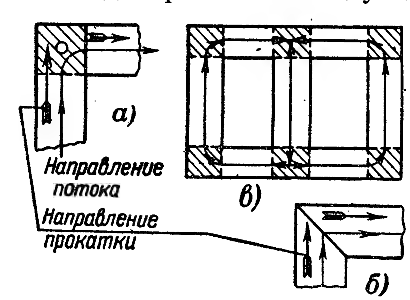



Рис. 6-4. Части сердечника, в которых возникают увеличенные потери в холоднокатаной стали.

Таблица 6-3

**Удельные потери в стали марки Э310-0,35 *мм*, при $f = 50$ *гц*, $p$ [*вт/кг*] (контрольные точки при индукциях 10 000, 15 000 и 17 000 *гс* по ГОСТ 802-54)**

| *B, гс* | *p, вт/кг* | *B, гс* | *p, вт/кг* | *B, гс* | *p, вт/кг* | *B, гс* | *p, вт/кг* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 000 | 0,42 | 9 000 | 0,84 | 12 000 | 1,385 | 15 000 | 2,20 |
| 6 200 | 0,44 | 9 200 | 0,87 | 12 200 | 1,435 | 15 200 | 2,275 |
| 6 400 | 0,465 | 9 400 | 0,905 | 12 400 | 1,480 | 15 400 | 2,35 |
| 6 600 | 0,49 | 9 600 | 0,935 | 12 600 | 1,525 | 15 600 | 2,435 |
| 6 800 | 0,52 | 9 800 | 0,965 | 12 800 | 1,575 | 15 800 | 2,52 |
| 7 000 | 0,545 | 10 000 | 1,00 | 13 000 | 1,625 | 16 000 | 2,615 |
| 7 200 | 0,575 | 10 200 | 1,035 | 13 200 | 1,68 | 16 200 | 2,72 |
| 7 400 | 0,60 | 10 400 | 1,07 | 13 400 | 1,735 | 16 400 | 2,83 |
| 7 600 | 0,63 | 10 600 | 1,10 | 13 600 | 1,79 | 16 600 | 2,95 |
| 7 800 | 0,655 | 10 800 | 1,14 | 13 800 | 1,85 | 16 800 | 3,06 |
| 8 000 | 0,685 | 11 000 | 1,175 | 14 000 | 1,905 | 17 000 | 3,20 |
| 8 200 | 0,72 | 11 200 | 1,22 | 14 200 | 1,965 | | |
| 8 400 | 0,75 | 11 400 | 1,26 | 14 400 | 2,02 | | |
| 8 600 | 0,78 | 11 600 | 1,30 | 14 600 | 2,085 | | |
| 8 800 | 0,81 | 11 800 | 1,34 | 14 800 | 2,14 | | |

Примечание. Для холоднокатаной стали других марок значения, полученные из таблицы, надо умножить на коэффициент $k$.

| Марка: | Э310-0,5 | Э320-0,5 | Э330-0,5 | Э320-0,35 | Э330-0,35 |
|---|---|---|---|---|---|
| $k$ | 1,23 | 1,12 | 1,05 | 0,9 | 0,8 |

частях сердечника возникают увеличенные потери. Для этих частей сердечника следует значение $p$, найденное по табл. 6-3, увеличивать на 40%.

Если сердечник собран из листов с косыми срезами, например по рис. 6-4,*б*, то направление магнитного потока во всех частях сердечника практически совпадает с направлением прокатки листов и добавочных потерь в углах сердечника не возникает.

При расчете потерь в сердечниках, собранных из прямоугольных листов холоднокатаной стали, вес стержней определяется по-прежнему по формуле (6-13), и потери в них рассчитываются по индукции стержня $B_с$ и табличным данным $p$ для применяемой марки стали. Вес ярем представляется в виде:

$$G_я = 3G''_я + (G'_я - 2G''_я) \ [кг], \qquad (6\text{-}19)$$

где $G'_я$ и $G''_я$ определяются по формулам (6-14) и (6-15). Первое слагаемое правой части (6-19) $3G''_я$ определяет вес тех частей ярем, в которых возникают увеличенные потери. При этом в одной половине объема этих частей по-

тери следует считать по индукции стержня $B_с$, в другой — по индукции ярма $B_я$. В том случае, когда ярмо имеет ступенчатую форму, вес частей ярма определяется по пакетам.

При расчете электропечного трансформатора потери холостого хода рассчитываются по формуле (6-18) для двух случаев включения трансформатора в первичную сеть: с обмоткой ВН, соединенной в треугольник, $P_{х\Delta}$ и с обмоткой ВН, соединенной в звезду, $P_{хY}$.

Ток холостого хода трансформатора рассчитывается как геометрическая сумма его активной и реактивной составляющих.

Активная составляющая тока холостого хода может быть найдена по формуле

$$I_{х.а}=\frac{P_х}{mU_ф}[а], \quad (6\text{-}20)$$

где $U_ф$ — фазное напряжение обмотки ВН трансформатора при соединении в треугольник [$в$];

$P_х$ — [$вт$].

Обычно определяют относительные величины тока холостого хода и его составляющих, относя их к номинальному току: $i_{о.а}$, $i_{о.р}$, $i_о$ и выражая в процентах номинального тока.

Тогда активная составляющая

$$i_{о.а}=\frac{I_{х.а}}{I_ф}100=\left(\frac{P_х}{mU_ф}:\frac{S}{mU_ф}\right)100=\frac{P_х}{S}100;$$

принимая во внимание, что $P_х$ обычно выражается в ваттах, а $S$ — в киловольтамперах, получаем:

$$i_{о.а}=\frac{P_х}{10S}[\%].$$

Реактивная (намагничивающая) составляющая тока холостого хода рассчитывается как сумма мощностей, необходимых для намагничения всех участков сердечника. Сердечник для расчета разбивается на три участка, в пределах которых индукцию можно считать постоянной: стержни, ярма и воздушные зазоры. Первые два участка различаются индукцией и общим объемом (весом) стали. Определение намагничивающей мощности для них подобно расчету потерь сводится к определению удельной намаг-

ничивающей мощности, отнесённой к единице веса $q$ [*ва/кг*], с последующим умножением на соответствующие веса.

Намагничивающая мощность для воздушных зазоров в сердечнике, собранном впереплет (шихтованном), определяется для эквивалентных сплошных зазоров, заменяющих реальный несплошной зазор [Л. 3]. Удельная намагничивающая мощность в этом случае зависит от качества стали, рассчитывается для единицы площади поперечного сечения стержня и ее зависимость от индукции определяется экспериментальным путем.

Полная намагничивающая мощность трансформатора теперь может быть выражена следующей формулой:

$$Q_х = q_с G_с + q_я G_я + n_з q_з П_с \, [ва], \qquad (6\text{-}21)$$

где $q_с$ и $q_я$ — удельные намагничивающие мощности для стержня и ярма, определяемые по табл. 6-4 для горячекатаной и по табл. 6-5 для холоднокатаной стали в зависимости от соответствующих индукций и имеющие размерности *ва/кг*; $G_с$ и $G_я$ — веса стали в стержнях и ярмах; $n_з$ — число воздушных зазоров (стыков) в сердечнике; $q_з$ — удельная намагничивающая мощность для воздушных зазоров, определяемая в *ва/см*$^2$ для индукции в стержне $B_с$ по табл. 6-4 и 6-5. $П_с$ — активное сечение стержня, *см*$^2$.

Таблица 6-4

**Удельная намагничивающая мощность для стали марок Э41 и Э42 0,35 и 0,5 *мм***

| *B, гс* | Сталь, *ва/кг* | Зазор, *ва/см*$^2$ | *B, гс* | Сталь, *ва/кг* | Зазор, *ва/см*$^2$ | *B, гс* | Сталь, *ва/кг* | Зазор, *ва/см*$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 000 | 2,25 | 0,125 | 9 800 | 4,36 | 0,449 | 12 600 | 13,14 | 1,491 |
| 7 200 | 2,35 | 0,135 | 10 000 | 4,60 | 0,491 | 12 800 | 14,42 | 1,606 |
| 7 400 | 2,45 | 0,145 | 10 200 | 4,92 | 0,543 | 13 000 | 15,7 | 1,722 |
| 7 600 | 2,55 | 0,157 | 10 400 | 5,24 | 0,595 | 13 200 | 17,42 | 1,858 |
| 7 800 | 2,65 | 0,172 | 10 600 | 5,62 | 0,652 | 13 400 | 19,14 | 1,994 |
| 8 000 | 2,75 | 0,188 | 10 800 | 6,06 | 0,714 | 13 600 | 21,16 | 2,141 |
| 8 200 | 2,87 | 0,208 | 11 000 | 6,50 | 0,776 | 13 800 | 23,48 | 2,299 |
| 8 400 | 2,99 | 0,228 | 11 200 | 7,10 | 0,850 | 14 000 | 25,8 | 2,457 |
| 8 600 | 3,14 | 0,251 | 11 400 | 7,70 | 0,924 | 14 200 | 28,68 | 2,637 |
| 8 800 | 3,32 | 0,277 | 11 600 | 8,40 | 1,004 | 14 400 | 31,56 | 2,819 |
| 9 000 | 3,50 | 0,303 | 11 800 | 9,20 | 1,090 | 14 600 | 35,1 | 3,012 |
| 9 200 | 3,70 | 0,335 | 12 000 | 10,0 | 1,176 | 14 800 | 39,3 | 3,216 |
| 9 400 | 3,90 | 0,369 | 12 200 | 11,0 | 1,278 | 15 000 | 43,5 | 3,420 |
| 9 600 | 4,12 | 0,407 | 12 400 | 12,0 | 1,382 | | | |

Таблица 6-5

**Удельная намагничивающая мощность для стали марки Э320 0,35 *мм***

| *B, гс* | Сталь, *ва/кг* | Зазор, *ва/см²* | *B, гс* | Сталь, *ва/кг* | Зазор, *ва/см²* | *B, гс* | Сталь, *ва/кг* | Зазор, *ва/см²* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 000 | 0,5 | 0,013 | 10 000 | 2,5 | 0,122 | 14 000 | 12,5 | 1,37 |
| 6 200 | 0,52 | 0,0136 | 10 200 | 2,7 | 0,14 | 14 200 | 13,46 | 1,48 |
| 6 400 | 0,54 | 0,0142 | 10 400 | 2,9 | 0,16 | 14 400 | 14,48 | 1,6 |
| 6 600 | 0,56 | 0,0148 | 10 600 | 3,14 | 0,18 | 14 600 | 15,57 | 1,72 |
| 6 800 | 0,58 | 0,0154 | 10 800 | 3,42 | 0,20 | 14 800 | 16,62 | 1,87 |
| 7 000 | 0,6 | 0,016 | 11 000 | 3,7 | 0,22 | 15 000 | 17,5 | 1,98 |
| 7 200 | 0,64 | 0,020 | 11 200 | 3,9 | 0,248 | 15 200 | 18,7 | 2,13 |
| 7 400 | 0,68 | 0,024 | 11 400 | 4,16 | 0,286 | 15 400 | 20,02 | 2,26 |
| 7 600 | 0,72 | 0,028 | 11 500 | 4,5 | 0,335 | 15 600 | 21,42 | 2,42 |
| 7 800 | 0,76 | 0,032 | 11 800 | 4,88 | 0,401 | 15 800 | 22,9 | 2,58 |
| 8 000 | 0,8 | 0,036 | 12 000 | 5,2 | 0,466 | 16 000 | 24,5 | 2,74 |
| 8 200 | 0,96 | 0,040 | 12 200 | 5,76 | 0,523 | 16 200 | 26,02 | 2,92 |
| 8 400 | 1,12 | 0,044 | 12 400 | 6,38 | 0,595 | 16 400 | 27,6 | 3,1 |
| 8 600 | 1,26 | 0,048 | 12 600 | 7,02 | 0,671 | 16 600 | 29,44 | 3,28 |
| 8 800 | 1,38 | 0,053 | 12 800 | 7,7 | 0,767 | 16 800 | 31,6 | 3,49 |
| 9 000 | 1,5 | 0,06 | 13 000 | 8,5 | 0,853 | 17 000 | 34,0 | 3,72 |
| 9 200 | 1,7 | 0,072 | 13 200 | 9,14 | 0,938 | 17 200 | 37,2 | 3,97 |
| 9 400 | 1,9 | 0,084 | 13 400 | 9,9 | 1,04 | 17 400 | 40,4 | 4,23 |
| 9 600 | 2,1 | 0,096 | 13 600 | 10,74 | 1,15 | 17 600 | 45,2 | 4,65 |
| 9 800 | 2,3 | 0,108 | 13 800 | 11,62 | 1,255 | | | |

Для стали других марок удельная намагничивающая мощность может быть приближенно найдена путем умножения значения, взятого из таблицы, на коэффициент $k$. Марка Э310 — $k = 1{,}10$; марка Э330 — $k = 0{,}90$. Для стали с толщиной листов 0,5 *мм* принимать данные стали 0,35 *мм*. Намагничивающая мощность для зазоров не зависит от марки, и для холоднокатаной стали марок Э310, Э320, Э330 она может быть взята из таблицы без пересчета.

Абсолютное фазное значение реактивной составляющей тока холостого хода можно определить по формуле

$$I_{\text{х.р}} = \frac{Q_{\text{х}}}{mU_{\text{ф}}} \, [a]. \qquad (6\text{-}22)$$

Относительное значение

$$i_{\text{о.р}} = \frac{Q_{\text{х}}}{10S} \, [\%]. \qquad (6\text{-}23)$$

Полный ток холостого хода:
абсолютное значение

$$I_{\text{х}} = \sqrt{I^2_{\text{х.а}} + I^2_{\text{х.р}}} \, [a]; \qquad (6\text{-}24)$$

относительное значение

$$i_{\text{о}} = \sqrt{i^2_{\text{о.а}} + i^2_{\text{о.р}}} \, [\%]. \qquad (6\text{-}25)$$

Ток холостого хода для электропечного трансформатора рассчитывается только для соединения обмотки ВН в треугольник.

# ГЛАВА СЕДЬМАЯ

# ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА

## 7-1. ЗАДАЧИ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА

Тепловой расчет электропечного трансформатора очень мало отличается от расчета нормального силового трансформатора. Поэтому в настоящей главе даются лишь минимально необходимые для теплового расчета сведения и рассматриваются некоторые особенности теплового расчета электропечного трансформатора. При необходимости более глубокого ознакомления с этим вопросом рекомендуется обратиться к [Л. 3] или [Л. 9].

Во время работы трансформатора в его активных материалах — меди обмоток и стали сердечника — возникают потери энергии, выделяющиеся в виде тепла. Вследствие выделения тепла обмотки и сердечник трансформатора начинают постепенно нагреваться. Вместе с ростом температуры возникает и увеличивается температурный перепад между обмоткой или сердечником и маслом, заполняющим трансформатор, а затем между маслом, залитым в бак, и окружающим трансформатор воздухом и вследствие возникновения перепада устанавливается теплоотдача от активных материалов к окружающей среде.

При проектировании большинства трансформаторов, в том числе предназначенных для питания электрических печей, тепловой расчет производится для установившегося теплового режима, когда все тепло, выделяющееся в обмотках и сердечнике, отводится в окружающую среду и температура всех частей трансформатора является стабильной. При этом тепловой поток проходит сложный путь, который может быть разбит на следующие участки: 1) перенос тепла от внутренних точек обмотки или сердечника до их наружных поверхностей, омываемых маслом; на этом участке теплопередача происходит путем теплопроводности; 2) переход тепла с наружной поверхности обмотки или сердечника в омывающее их масло; 3) перенос тепла от обмоток и сердечника к внутренней поверхности стенок бака или теплообменника; на этом участке тепло передается путем конвекционного тока масла (излучением тепла в масле практически можно пренебречь); 4) переход тепла от масла к внутренней поверхности стенок бака или теплообменника; 5) переход тепла с наружной поверхности бака в окружающий воздух или передача тепла к охлаждающей среде в теплообменнике.

Задача теплового расчета трансформатора заключается: 1) в определении перепадов температур между обмотками и сердечником, с одной стороны, и маслом — с другой; 2) в подборе конструкции и размеров бака или охладительной системы, обеспечивающих нормальную теплоотдачу всех потерь при температурах обмоток и сердечника, не превышающих допустимые температуры; 3) в поверочном расчете превышений температуры обмоток, сердечника и масла над температурой окружающего воздуха.

Температурное поле внутри масляного трансформатора является очень сложным и расчет его для каждого трансформатора представляет практически невыполнимую задачу. В практике принято, однако, проводить упрощенный расчет средних превышений температуры обмоток над температурой масла и температуры масла над температурой воздуха, с определением максимального превышения температуры масла над температурой воздуха. Этот способ расчета, помимо его простоты, представляет и то практическое удобство, что его результаты могут быть проверены экспериментальным путем: средняя температура обмотки может быть измерена по изменению ее активного сопротивления, а максимальная температура масла — термометром.

В тепловом отношении трансформатор должен быть рассчитан так, чтобы превышения температуры его обмоток, сердечника и масла над температурой окружающего воздуха или охлаждающей воды при номинальной нагрузке не превышали величин, допускаемых ГОСТ или техническими условиями. Нормы допустимых температур устанавливаются с таким расчетом, чтобы изоляция трансформатора не подвергалась ускоренному старению и могла надежно работать не менее 15—20 лет.

Для нормальных силовых трансформаторов нагрев ограничивается § 18 ГОСТ 401-41, которым устанавливаются следующие предельные превышения температуры частей трансформатора над температурой окружающей среды (воздуха или воды) при сколь угодно длительно поддерживаемых во время испытания потерях холостого хода и потерях короткого замыкания, приведенных к 75° С:

| | | |
|---|---|---|
| Обмотки . . . . . . . . . . . . . . . . | не более | 70° С |
| Сердечник . . . . . . . . . . . . . . . . | „ „ | 75° С |
| Масло в верхних слоях . . . . . . . . . . | „ „ | 60° С |

При этом температура охлаждающего воздуха не должна превышать +35° С, а воды при водяном охлаждении +25° С.

Нормы нагрева на электропечные масляные трансформаторы в стандарте не установлены и даются в технических условиях. Обычно электропечные трансформаторы, учитывая более тяжелые условия охлаждения для установок внутри металлургических цехов, рассчитывают с меньшими температурными перепадами, допуская превышения над температурой охлаждающей среды — воздуха или воды:

| | | |
|---|---|---|
| Для обмоток | не более | 60° С |
| Для сердечника | „ „ | 65° С |
| Для масла в верхних слоях | „ „ | 50° С |

## 7-2. ПОВЕРОЧНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ОБМОТОК

Тепловой расчет трансформатора производится после завершения электромагнитного и механического расчета его обмоток и сердечника. При правильном выборе электромагнитных нагрузок и правильном распределении и выборе размеров охлаждающих каналов внутренние и внешние (по отношению к маслу) перепады температур в обмотках и сердечнике оказываются не выше обычно допускаемых величин.

Расчет внутреннего перепада температур в винтовых и спиральных катушечных обмотках из прямоугольного провода упрощается в связи с тем обстоятельством, что каждый провод, как правило, одной или двумя сторонами своего сечения соприкасается с маслом. Внутренний перепад температур в этом случае определяется по формуле

$$\Theta_0 = \frac{q\delta}{\lambda_{из}} 10^{-4} \, [°C], \qquad (7\text{-}1)$$

где $q$ — плотность теплового потока, определяемая по формуле (4-15), *вт/м*;

$\delta$ — толщина изоляции по рис. 7-1, *см*;

$\lambda_{из}$ — теплопроводность изоляции провода, *вт/см*·°С, определяемая для различных материалов по табл. 7-1.

Для многослойной цилиндрической катушечной обмотки, внутренние провода которой не имеют соприкосновения с маслом, расчет внутреннего перепада температур усложняется. Полный максимальный внутренний перепад для этой обмотки может быть подсчитан по формуле

$$\Theta_0 = \frac{p l_р^2}{8\left(\lambda_х + \lambda_y \frac{l_р^2}{h_к^2}\right)} \, [°C]. \qquad (7\text{-}2)$$

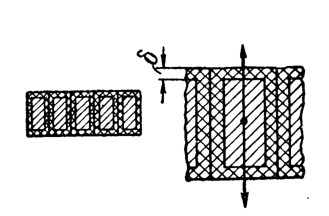



Рис. 7-1. К расчету внутреннего перепада температур в обмотках из прямоугольного провода.

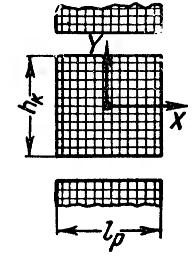



Рис. 7-2. К расчету внутреннего перепада температур в катушечной обмотке из круглого провода.

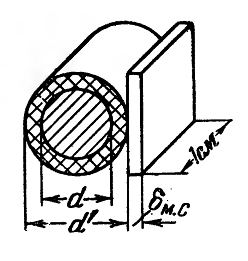



Рис. 7-3. Элемент объема обмотки — провод и междуслойная изоляция.

Таблица 7-1

**Удельные теплопроводности различных изоляционных материалов**

| Материал | $\lambda_{из}$, $\frac{вт}{см \cdot °C}$ |
|---|---|
| Лакоткань | 0,0025 |
| Бумага сухая | 0,0012 |
| Бумага промасленная | 0,0014 |
| Бумага, пропитанная лаком | 0,0017 |
| Электрокартон, пропитанный лаком | 0,0017 |

Величины, входящие в формулу (7-2), определяются следующим образом:

$l_р$, $h_к$, *см*—по рис. 7-2; $p$—потери, выделяющиеся в 1 *см*³ общего объема обмотки, — по формуле (7-3) согласно рис. 7-3:

$$p = 1{,}68 \frac{\Delta^2 d^2}{(d' + \delta_{мс})\, d'} 10^{-2} \, [вт/см^3], \qquad (7\text{-}3)$$

где $d$, $d'$, $\delta_{мс}$ — в *см*;

$\Delta$ — в $а/мм^2$;

$\lambda_y$ — средняя теплопроводность обмотки в направлении оси $Y$, равная $\lambda$ — средней теплопроводности обмотки без учета междуслойной изоляции:

$$\lambda_y = \lambda = \frac{\lambda_{из}}{0{,}7a^{0{,}55}} \, [вт/см \cdot °C], \qquad (7\text{-}4)$$

где $\lambda_{из}$ — теплопроводность материала изоляции витков, определяемая по табл. 7-1;

$\alpha = \frac{d' - d}{d}$ — по рис. 7-3;

$\lambda_x$ — средняя теплопроводность обмотки в направлении оси $X$ с учетом междуслойной изоляции:

$$\lambda_x = \frac{\lambda\lambda_{мс}(d' + \delta_{мс})}{\lambda\delta_{мс} + \lambda_{мс}d'} [вт/см \cdot °C]; \tag{7-5}$$

$\lambda_{мс}$ — теплопроводность материала междуслойной изоляции по табл. 7-1.

Средний перепад температур внутри обмотки составит $2/3\,\Theta_0$, или

$$\Theta_{о.ср} = \frac{2}{3}\Theta_0\ [°C]. \tag{7-6}$$

Перепад температур на поверхности обмотки — между обмоткой и маслом — является функцией плотности теплового потока на поверхности обмотки $q$, определяемой по формуле (4-15) или (4-38). Формулы, применяемые в практике расчета для определения перепада температур на поверхности обмотки, получены эмпирически. Их применение ограничено только теми случаями, для которых они проверены опытом.

Перепад температур на поверхности винтовых, спиральных катушечных и многослойных цилиндрических катушечных обмоток с катушками, разделенными горизонтальными масляными каналами для чередующихся обмоток, определяется по формуле

$$\Theta_{о.м} = k_1 k_2 0{,}35 q^{0{,}6}\ [°C]. \tag{7-7}$$

Коэффициент $k_1$ учитывает скорость движения масла внутри обмотки, зависящую от системы охлаждения:

Для естественного масляного охлаждения . . . $k$=1,0
Для масляного охлаждения с дутьем . . . . . . $k$=0,90
Для водомасляного охлаждения с принудительной циркуляцией масла . . . . . . . . . . . . . $k$=0,70

Коэффициент $k_2$ учитывает влияние на конвекцию масла относительной высоты горизонтальных масляных каналов и может быть взят по табл. 7-2 в зависимости от отношения высоты канала к его глубине (ширине обмотки) $\frac{h_к}{l_р}$

Таблица 7-2

**Значения коэффициента $k_2$ в формуле (7-7)**

| $h_k/l_p$ | 0,07—0,08 | 0,08—0,09 | 0,1 | 0,11—0,12 | 0,13—0,14 | 0,15—0,19 | 0,2 и более |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $k_2$ | 1,1 | 1,05 | 1,00 | 0,95 | 0,90 | 0,85 | 0,8 |

После определения внутреннего и внешнего перепадов температур в обмотках для каждой из обмоток подсчитывается среднее превышение ее температуры над средней температурой масла:

$$\Theta_{о.м.ср} = \Theta_{о.ср} + \Theta_{о.м} \, [^\circ C]. \quad (7\text{-}8)$$

## 7-3. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ БАКА

При выборе системы охлаждения и конструкции бака для электропечного трансформатора главное внимание следует обратить на хорошую теплоотдачу, механическую прочность, простоту в изготовлении и по возможности меньший внешний габарит. Величина охлаждаемой поверхности бака должна соответствовать величине теплового потока, отводимого с этой поверхности в окружающий воз-

Таблица 7-3

**Системы охлаждения электропечных трансформаторов**

| Мощность трансформатора, *ква* | Система охлаждения | Конструкция бака |
|---|---|---|
| До 1 800 | Естественное масляное | Гладкий бак с приваренными трубами |
| 3 000—5 000 | Естественное масляное | Гладкий бак с навесными охладителями (радиаторами) |
| 3 000 и более | Принудительная циркуляция масла в системе бак—водяной или воздушный теплообменник | Гладкий бак |

дух, т. е. полным потерям трансформатора. Ввиду того что потери в трансформаторе связаны с его мощностью, при выборе конструкции и размеров бака можно ориентироваться на мощность трансформатора.

Для электропечных трансформаторов при выборе системы охлаждения и конструкции бака можно ориентироваться на табл. 7-3, где приведены ныне применяемые системы охлаждения и пределы их применения.

После выбора типа бака определяются его минимальные внутренние размеры. При заданных размерах выемной части трансформатора, т. е. его сердечника с обмотками и отводами, минимальные внутренние размеры бака в плане определяются внешними габаритами выемной части и минимально необходимыми расстояниями от обмоток и отводов до стенок бака. При этом минимальные расстояния от отводов и обмоток ВН определяются как минимальные изоляционные расстояния по табл. 3-5 (рис. 7-4). Расстояние от отводов НН до обмоток ВН определяется так же, как минимальное изоляционное, по табл. 3-5, а от стенок бака в целях получения меньших потерь в стенках расстояние берется не менее ширины шины (см. § 5-2).

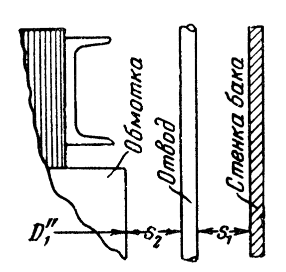



Рис. 7-4. Определение расстояния от обмотки до стенки бака.

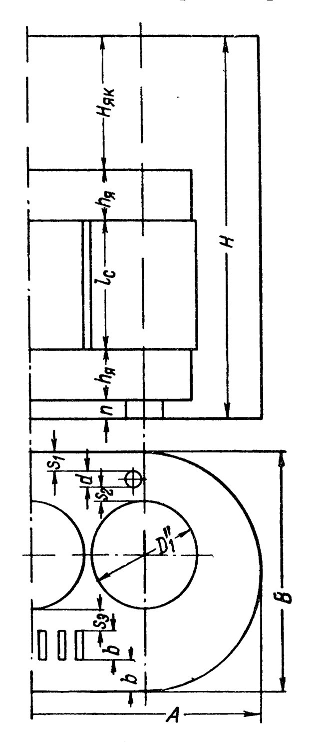



Рис. 7-5. К определению основных размеров бака.

Минимальные внутренние размеры бака определяются согласно рис. 7-5.

Минимальная длина бака в плане

$$A = 2C + D_1'' + 2s_1 \, [см]. \qquad (7\text{-}9)$$

Минимальная ширина

$$B = D_1'' + s_1 + s_2 + d_1 + s_3 + 2b \, [см]. \qquad (7\text{-}10)$$

Глубина бака $H$ определяется высотой выемной части и минимальным расстоянием от верхнего ярма до крышки бака $H_{як}$, обеспечивающим размещение внутренних частей проходных изоляторов, отводов и переключателей, если переключатели крепятся под крышкой бака:

$$H = H_в + H_{як} = l_с + 2h_я + n + H_{як} \, [см], \qquad (7\text{-}11)$$

где $n$ — толщина подкладки под нижнее ярмо:

$$n = 3 \div 5 \ см.$$

Выбор минимального расстояния $H_{як}$ может быть сделан по табл. 7-4 по классу изоляции (рабочему напряжению) обмотки ВН. Это расстояние может быть значительно увеличено, если по условиям охлаждения будет необходимо увеличить поверхность (высоту) бака. Практически в большинстве трансформаторов принимают величину $H_{як}$ в 1,5 — 2 раза большей, чем минимальное расстояние по табл. 7-4.

Таблица 7-4

**Минимальное расстояние от ярма до крышки бака**

| Класс изоляции обмотки ВН, *кв* | Минимальное расстояние $H_{як}$, *см* |
|---|---|
| 6 | 27,0 |
| 10 | 30,0 |
| 35 | 47,0 |

Теплоотдача с внешней поверхности бака в окружающий воздух происходит путем излучения и конвекции. При длительной нагрузке трансформатора и установившемся тепловом режиме все потери, выделяющиеся в виде тепла, отводятся с внешней поверхности бака при вполне определенном установившемся среднем превышении температуры поверхности бака над окружающим воздухом. Это среднее превышение температуры $\Theta_{б.в}$ для данного бака определяется величиной теплового потока, отводимого с поверхности, а также величиной и формой самой поверхности.

Теплоотдача путем излучения со всей поверхности бака может быть выражена в виде:

$$Q_и = q_и \Theta_{б.в} П_и \,[вт], \qquad (7\text{-}12)$$

где $q_и$ $[вт/м^2]$ — удельная теплоотдача путем излучения с единицы излучающей поверхности $П_и$ при разности температур стенки бака и воздуха, равной 1° С, $q_и$ зависит от $\Theta_{б.в}$ и может быть принята равной $q_и = 2{,}8 \sqrt[4]{\Theta_{б.в}}$ $[вт/м^2]$;

$П_и$ $[м^2]$ — поверхность излучения бака, определяемая как его внешняя обтягивающая поверхность.

Теплоотдачу с поверхности бака путем конвекции можно записать в виде:

$$Q_к = q_к \cdot \Theta_{б.в} П_к \,[вт], \qquad (7\text{-}13)$$

где $q_к$ $[вт/м^2]$ — удельная теплоотдача путем конвекции с единицы поверхности конвекции $П_к$ при разности температур 1°С; $q_к$ зависит от разности температур $\Theta_{б.в}$ и может быть для бака с гладкими стенками принята равной $q_к = 2{,}5 \sqrt[4]{\Theta_{б.в}}$ $[вт/м^2]$;

$П_к$ $[м^2]$ — поверхность конвекции бака, т. е. полная развернутая суммарная поверхность его гладкой части, труб, охладителей и других элементов, рассчитанная с учетом особенностей их формы и условий конвекции воздуха вокруг них.

Полная теплоотдача $Q$ равняется полным потерям трансформаторного агрегата, включая трансформатор и реактор, $\Sigma P$:

$$\Sigma P = Q = Q_и + Q_к. \qquad (7\text{-}14)$$

Необходимо учесть, что действительные потери трансформатора могут отличаться от расчетных на $\pm 5\%$. Поэтому тепловой расчет обычно ведут для $Q = 1{,}05 \Sigma P$ $[вт]$.

Тогда

$$1{,}05 \Sigma P = Q_и + Q_к;$$

$$1{,}05\Sigma P = 2{,}8\sqrt[4]{\Theta_{б.в}}\,\Theta_{б.в}П_и + 2{,}5\sqrt[4]{\Theta_{б.в}}\,\Theta_{б.в}П_к;$$

$$\Theta_{б.в} = \left[\frac{1{,}05\Sigma P}{2{,}8П_и + 2{,}5П_к}\right]^{0{,}8} [°C] \qquad (7\text{-}15)$$

при

$$\Sigma P — в\ [вт],\ П_и\ и\ П_к — в\ [м^2].$$

Формула (7-15) позволяет рассчитать $\Theta_{б.в}$ при известных величинах поверхностей $П_и$ и $П_к$. Обычно размеры бака и его элементов определяются путем подбора с проверкой

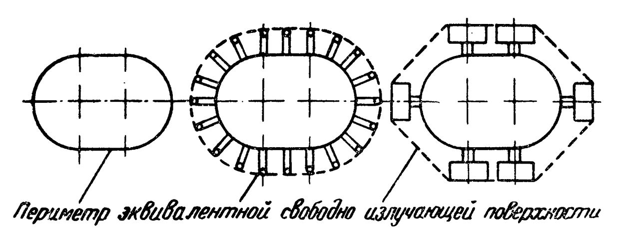



Рис. 7-6. Определение периметра эквивалентной излучающей поверхности для гладкого и трубчатого баков и бака с охладителями.

превышения температуры по формуле (7-15) и последующей корректировкой первоначально выбранных размеров.

Поверхность излучения стенки бака $П_и$ определяется как его обтягивающая поверхность по внешнему периметру $p_и$ труб, охладителей и т. п. так, как это показано на рис. 7-6:

$$П_и = p_и H \cdot 10^{-4} + 0{,}5П_{кр}\ [м^2], \qquad (7\text{-}16)$$

где $p_и$ [см] — периметр излучающей поверхности;

$H$ [см] — высота бака;

$П_{кр}$ [$м^2$] — площадь крышки бака трансформатора. Коэффициент 0,5 учитывает закрытие крышки бака изоляторами и арматурой.

Поверхность конвекции бака можно определить по формуле

$$П_к = k_1П_1 + k_2П_2 + \ldots + k_nП_n\ [м^2], \qquad (7\text{-}17)$$

где $П_1$, $П_2$, ..., $П_n$ — действительные геометрические поверхности отдельных частей бака;

$k_1, k_2, \ldots, k_n$ — коэффициенты, учитывающие улучшение или ухудшение теплоотдачи путем конвекции для данной формы поверхности по сравнению с гладкой вертикальной стенкой.

Эти коэффициенты могут быть найдены по табл. 7-5.

Таблица 7-5

**Значения коэффициентов $k$ в формуле (7-17)**

| Форма поверхности | Без дутья | | | | | С дутьем по рис. 1-10 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Гладкая стенка | Трубы | | | | гладкая стенка | трубы |
| | | в 1 ряд | в 2 ряда | в 3 ряда | в 4 ряда | | |
| $k$ | 1,0 | 1,4 | 1,4·0,96=<br>=1,344 | 1,4×<br>×0,93=<br>=1,302 | 1,4·0,9=<br>=1,26 | 1,0·1,6=<br>=1,6 | 1,4·1,6=<br>=2,24 |

Гладкий бак. Применяется для электропечных трансформаторов большой мощности при форсированном водомасляном охлаждении. Теплоотдача со стенок бака учитывается в общем тепловом балансе трансформатора. Для гладкого бака поверхность излучения $П_и$, равная его внешней геометрической поверхности, равна также поверхности конвекции $П_к$. Для прямоугольного бака

$$П_и = П_к = 2(A + B) H \cdot 10^{-4} + 0{,}5 П_{кр} \quad [м^2]; \qquad (7\text{-}18)$$

для овального бака

$$П_и = П_к = [2(A - B) + \pi B] H \cdot 10^{-4} + 0{,}5 П_{кр} \quad [м^2], \qquad (7\text{-}19)$$

где размеры $A$, $B$, $H$, *см* — по рис. 7-5.

Трубчатый бак (рис. 7-7). Число рядов труб выбирается 1—4. Увеличение числа рядов труб свыше 4 значительно ухудшает теплоотдачу внутреннего ряда труб. Соседние трубы разных рядов располагаются одна над другой. Расположение труб в шахматном порядке менее выгодно, так как при этом затрудняется циркуляция воздуха и уменьшается теплоотдача. На рис. 7-7 показана одна из конструкций трубчатой стенки. Все трубы имеют один радиус изгиба $R$. Шаг труб в ряду $t$ и расстояние между ря-

дами взяты одинаковыми. Обозначение размеров — согласно рис. 7-7. Число рядов труб $n$, число труб в рядах $m_1$, $m_2$, $m_3$ и т. д.; развернутая длина трубы по рядам $l_1$, $l_2$, $l_3$ и т. д.

Основные размеры обычно принимаются следующими:

диаметр трубы . . . . . . . . . . . . . . $d=4\div5$ *см*
шаг в ряду и между рядами . . . . . . $t=(1,5\div2,0)\ d$
радиус закругления . . . . . . . . . . . $R=(3\div3,5)\ d$

Развернутая длина трубы определяется по формулам: первый (внутренний) ряд

$$l_1=(b_1-2R)+\Pi R+2a_1=b_1+1,14R+2a_1\ [см];\qquad (7\text{-}20)$$

второй ряд

$$l_2=l_1+4t\ [см];\qquad (7\text{-}20')$$

третий ряд

$$l_3=l_2+4t\ [см]\ \text{и т. д.}\qquad (7\text{-}20'')$$

При выводе формул (7-20) принято: $a_2=a_1+t$; $a_3=a_2+t$ и т. д.; $b_2=b_1+2t$; $b_3=b_2+2t$ и т. д.

Поверхность излучения бака с трубами

$$\Pi_и=[2(A-B)+\pi(B+2a_1+2R+2t(n-1)+d)]H\cdot10^{-4}+0,5\Pi_{кр}\ [м^2].\qquad (7\text{-}21)$$

Поверхность конвекции

$$\Pi_к=\Pi_{к.гл}k_{гл}+\Pi_{к.тр}k_{тр}\ [м^2],\qquad (7\text{-}22)$$

где $\Pi_{к.гл}$ — поверхность гладкой части бака и крышки, определяемая по формуле (7-19);

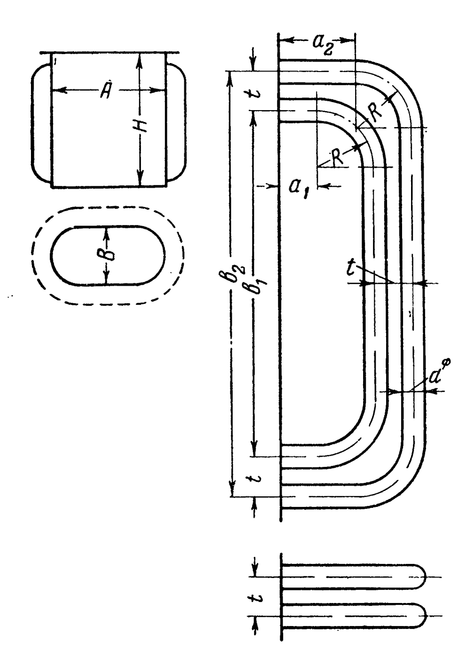
$\Pi_{к.тр}$ — поверхность конвекции труб:

$$\Pi_{к.тр}=\pi d(m_1l_1+m_2l_2+\ldots+m_nl_n)\cdot10^{-4}\ [м^2];\qquad (7\text{-}23)$$

$k_{гл}$ и $k_{тр}$ — коэффициенты, определяемые по табл. 7-5.

При расчете электропечных трансформаторов с трубчатым баком мощностью до 1 500 *ква* включительно можно в качестве первого приближения взять размеры, число труб и т. д. по данным табл. 7-6. Эти размеры и данные следует проверить по условиям изоляции [формулы (7-9) — (7-11)] и произвести расчет превышения температуры масла и обмоток над температурой воздуха по § 7-3 и 7-4. При несоответствии размеров бака по тому или другому условию следует внести соответствующие коррективы и снова произвести проверку.

**Бак с навесными охладителями (радиаторами).** Охладители обычно состоят из труб круглого или овального сечения, изогнутых и вваренных верхними и нижними концами в коллекторы — прямоугольные стальные сварные коробки. Количество охладителей и их расположение определяются ве-



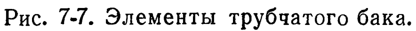



Рис. 7-7. Элементы трубчатого бака.

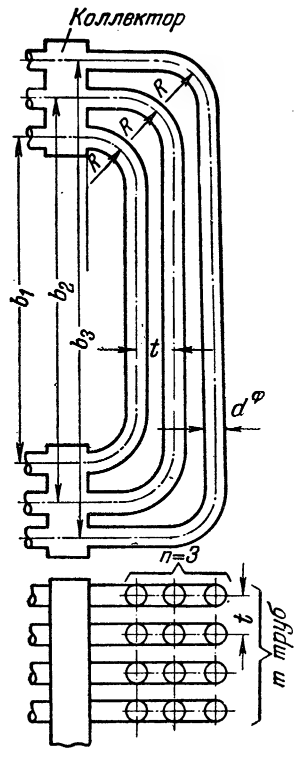



Рис. 7-8. Трубчатый охладитель.

личиной необходимой поверхности охлаждения и необходимостью получить наименьший общий габарит бака.

Поверхность излучения бака

$$П_и = p_и H \cdot 10^{-4} + 0{,}5 П_{кр} \ [м^2], \qquad (7\text{-}24)$$

где $p_и$ определяется по рис. 7-6.

На рис. 7-8 показана одна из применяемых конструкций трубчатого охладителя. Обозначим: число рядов труб — $n$; число труб в ряду — $m$; развернутую длину трубы в первом, втором и т. д. рядах — $l_1$, $l_2$ и т. д.

Таблица 7-6

## Ориентировочные данные трубчатых баков (рис. 7-7)

| Тип трансформатора | Размеры бака, *см* | | | Число рядов труб | Шаг $t$, *см* | 1-й ряд труб | | | 2-й ряд труб | | | 3-й ряд труб | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | длина $A$ | ширина $B$ | глубина $H$ | | | $b_1$ | $a_1$ | $m_1$ | $b_2$ | $a_2$ | $m_2$ | $b_3$ | $a_3$ | $m_3$ |
| ЭПОМ-175/10 | 104 | 60 | 155 | 1 | 7,5 | 133 | 6,0 | 26 | — | — | — | — | — | — |
| ЭПОМ-250/10 | 104 | 60 | 155 | 1 | 7,5 | 133 | 6,0 | 38 | — | — | — | — | — | — |
| ЭТМ-225/10 | 132 | 57 | 126 | 2 | 7,5 | 100 | 1,5 | 36 | 85 | 9,0 | 36 | — | — | — |
| ЭТМ-400/10 | 140 | 60 | 133,5 | 2 | 7,5 | 94 | 13,5 | 48 | 109 | 21,0 | 45 | — | — | — |
| ЭТМ-1000/10 | 171 | 79 | 237,5 | 3 | 7,5 | 195 | 5,7 | 62 | 210 | 13,2 | 62 | 210 | 20,7 | 12 |
| ЭТМ-1500/10 | 183 | 86 | 277,5 | 3 | 7,5 | 210 | 5,8 | 62 | 225 | 13,2 | 62 | 240 | 20,7 | 62 |

Примечание. Размеры, не включенные в таблицу (рис. 7-7), приняты следующими: диаметр трубы $d$=5,1/4,74 *см*; радиус изгиба $R$=15 *см*; ширина крышки $B_{кр}=B+14$ *см*; длина крышки $A_{кр}=A+14$ *см*.

Тогда

$$l_1 = b_1 + 1{,}14R; \quad l_2 = l_1 + 4t; \quad l_3 = l_2 + 4t.$$

Поверхность конвекции охладителя: двойной охладитель (по рис. 7-8)

$$П_{к.охл} = 2\pi dm (l_1 + l_2 + \ldots + l_m) k \cdot 10^{-4} + 2П_{к.к}\ [м^2]; \quad (7\text{-}25)$$

одинарный охладитель (трубы располагаются только с одной стороны коллектора)

$$П_{к.охл} = \pi dm (l_1 + l_2 + \ldots + l_m) k \cdot 10^{-4} + 2П_{к.к}\ [м^2], \quad (7\text{-}26)$$

где $k$ — коэффициент, определяемый по табл. 7-5;
$П_{к.к}$ $[м^2]$ — геометрическая поверхность одного коллектора.

Полная поверхность конвекции бака

$$П_к = \Sigma П_{к.охл} + П_{к.гл}\ [м^2], \quad (7\text{-}27)$$

где $П_{к.гл}$ определяется по формуле (7-19).

## 7-4. ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ПРЕВЫШЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТОК И МАСЛА ТРАНСФОРМАТОРА

После окончательного установления размеров бака и определения поверхностей излучения и конвекции необходимо подсчитать действительные превышения температур обмоток и масла над температурой окружающего воздуха. Подсчет производится для потерь в трансформаторном агрегате, включая трансформатор и реактор, повышенных на 5% против расчетной величины $\Sigma P$ при индивидуальном расчете и на 10% — против гарантийной величины при расчете серии. Для электропечных трансформаторов, работающих в течение одной плавки $T_\Delta$, *ч* при соединении в треугольник и $T_\lambda$, *ч* при соединении в звезду, сумма потерь определяется по формуле

$$\Sigma P = 1{,}05 \left[ \frac{(P_{x\Delta} + P_{x.р} + P_{к.р}) T_\Delta + P_{x\lambda} T_\lambda}{T_\Delta + T_\lambda} + P_к \right] [вт], \quad (7\text{-}28)$$

где $P_{x\Delta}$ и $P_{x\lambda}$ — потери холостого хода трансформатора при соединении обмоток ВН в треугольник и звезду;

$P_к$ — потери короткого замыкания трансформатора;

$P_{х.р}$ и $P_{к.р}$ — потери холостого хода и короткого замыкания реактора.

Среднее превышение температуры стенки бака над окружающим воздухом

$$\Theta_{б.в}=\left(\frac{\Sigma P}{2,8П_и+2,5П_к}\right)^{0,8}\ [^\circ C]. \qquad (7\text{-}29)$$

Среднее превышение температуры масла вблизи стенки над температурой стенки бака может быть приближенно подсчитано по формуле

$$\Theta_{м.б}=0,165\left(\frac{\Sigma P}{\Sigma П_к}\right)^{0,6}\ [^\circ C], \qquad (7\text{-}30)$$

где $\Sigma П_к$ — сумма поверхностей конвекции гладкой части, труб, крышки и т. д., без учета коэффициентов улучшения или ухудшения конвекции.

Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой окружающего воздуха

$$\Theta_{м.в.в}=\sigma\left(\Theta_{б.в}+\Theta_{м.б}\right)\ [^\circ C]; \qquad (7\text{-}31)$$

коэффициент $\sigma$ для трубчатых баков и баков с охладителями может быть принят равным 1,2.

Превышение температуры обмоток над температурой окружающего воздуха подсчитывается для обмоток ВН и НН отдельно по формуле

$$\Theta_{о.в}=\Theta_{о.м.ср}+\Theta_{м.б}+\Theta_{б.в}\ [^\circ C]. \qquad (7\text{-}32)$$

Превышения температуры масла в верхних слоях и обмоток над температурой окружающего воздуха, подсчитанные по формулам (7-31) и (7-32), не должны быть больше величин, допустимых по техническим условиям на рассчитываемый трансформатор.

*ГЛАВА ВОСЬМАЯ*

# РАСЧЕТ РЕАКТОРА

## 8-1. КОНСТРУКЦИЯ РЕАКТОРА

Для ограничения тока короткого замыкания трансформаторного агрегата величиной, не превышающей 2,5—4-кратный номинальный ток, необходимо выдержать доста-

точно большое суммарное индуктивное сопротивление самого агрегата и короткой сети.

При мощности агрегата примерно 10 000 *ква* и более суммарное сопротивление короткой сети и трансформатора оказывается достаточным для этой цели. При меньших мощностях приходится вводить в цепь реактор или искусственным путем увеличивать индуктивное сопротивление (напряжение короткого замыкания) трансформатора. В случае применения схемы с реактором он может быть полностью или частично отключен по миновании надобности, т. е. при переходе от первого ко второму периоду плавки. Второй способ менее удобен, так как индуктивное сопротивление трансформатора не может быть уменьшено в процессе проведения плавки и он остается включенным как в первый, так и в последующие периоды плавки, когда опасность коротких замыканий на электродах печи практически исключена.

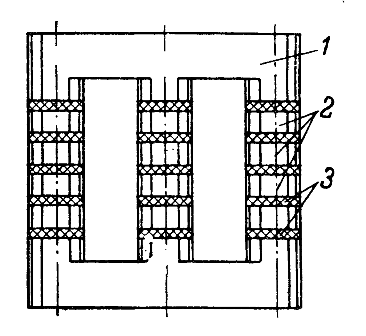


Рис. 8-1. Сердечник трехфазного реактора.

*1* — ярмо; *2* — элементы стержня сердечника; *3* — немагнитные зазоры, образованные электрокартонными прокладками.

Реактор обычно выполняется в виде катушки из медного провода, посаженной на стальной сердечник, и размещается в общем баке с трансформатором, чаще всего между верхним ярмом трансформатора и крышкой бака. В целях увеличения индуктивности реактора стержни сердечника разбиваются по высоте на несколько элементов, разделенных зазорами, заполненными немагнитным материалом — обычно прокладками из электроизоляционного картона (рис. 8-1). Вся конструкция стягивается вертикальными шпильками, скрепляющими верхнее ярмо реактора с нижним.

Каждый элемент стержня (рис. 8-2) собирается из оклеенных бумагой или лакированных пластин электротехнической стали одинаковой ширины $H$ и стягивается при диаметре стержня до 25 *см* одной, а при большем диаметре — двумя шпильками диаметром 12 *мм*. Для размещения прессующей стальной накладки и гаек в пределах, ограниченных окружностью стержня (рис. 2-8), необходимо выдержать размер $e=2{,}0$ *см* при одной и $e=2{,}5$ *см* при двух шпильках.

Изменение индуктивного сопротивления и мощности реактора достигается в этой конструкции путем изменения диаметра и сечения стержня или — чаще — путем изменения числа и размеров немагнитных промежутков в стержнях сердечника. В последнем случае для нескольких реакторов различных мощностей остается неизменным боль-

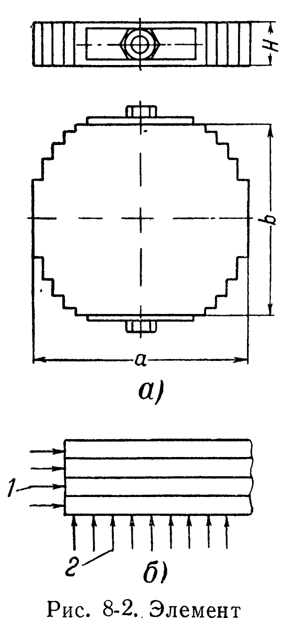



Рис. 8-2. Элемент стержня сердечника.

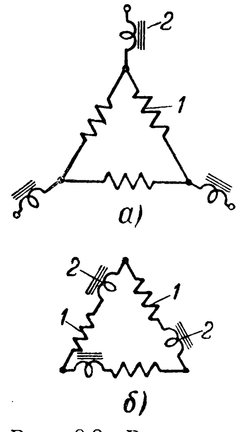



Рис. 8-3. Включение реактора.

*а* — „в линию"; *б* — „в фазу"; *1*—обмотки ВН трансформатора; *2* — обмотки реактора.

шинство деталей остова, за исключением только вертикальных стяжных шпилек.

Обмотки реакторов по конструкции не отличаются от концентрических обмоток нормальных силовых трансформаторов [Л. 3]. В них могут применяться цилиндрические, винтовые и непрерывные спирально-катушечные обмотки. Изоляция обмоток реакторов по конструкции и размерам также может быть принята одинаковой с изоляцией нормальных силовых трансформаторов при равных испытательных напряжениях (см. § 3-2).

Реактор может быть включен «в линию» — между сетью и линейными зажимами обмотки ВН трансформатора (рис. 8-3,*а*) или «в фазу» — последовательно с фазной обмоткой трансформатора (рис. 8-3,*б*). Обмотки реактора могут выполняться с отпайками, позволяющими изменять его сопротивление (см. рис. 1-2), или без них. В последнем

случае реактор вводится в цепь агрегата или отключается полностью.

Расчет основных электрических величин реактора производится в соответствии со схемой его включения. При этом должно быть задано падение напряжения на реакторе при номинальном токе, выраженное в процентах номинального напряжения сети $u_{кр}$.

При включении реактора «в линию» номинальное напряжение

$$U = \frac{u_{кр} U_1}{100\sqrt{3}} \ [в]; \qquad (8\text{-}1)$$

номинальный ток

$$I = I_1 \ [а]. \qquad (8\text{-}2)$$

При включении „в фазу“ номинальное напряжение

$$U = \frac{u_{кр} U_1}{100} \ [в]; \qquad (8\text{-}1')$$

номинальный ток

$$I = \frac{I_1}{\sqrt{3}} \ [а]. \qquad (8\text{-}2')$$

Мощность реактора в обоих случаях: полная

$$S = \frac{u_{кр}}{100} S_1 \ [ква]; \qquad (8\text{-}3)$$

на один стержень

$$S' = \frac{S}{c} \ [ква].$$

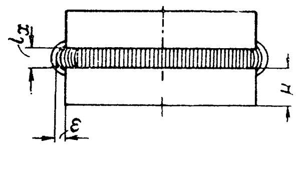
Здесь $I_1$, $U_1$, $S_1$ — номинальные (линейные) ток, напряжение и мощность обмотки ВН трансформатора; $c$ — число активных стержней реактора.

Активное сопротивление реактора по сравнению с его реактивным сопротивлением обычно настолько мало, что при расчете падения напряжения на реакторе определяют только реактивное падение напряжения, пренебрегая активным, т. е. принимают для реактора

$$u_к \approx u_р.$$

## 8-2. РАСЧЕТ СЕРДЕЧНИКА РЕАКТОРА

Магнитный поток реактора можно условно разделить на две части: основной поток $\Phi_с$, проходящий в стальном сердечнике и пересекающий немагнитные зазоры между элементами стержня сердечника, и поток рассеяния $\Phi_р$, проходящий в пространстве между наружной поверхностью стержней сердечника и внутренней поверхностью обмоток, а также внутри объема обмоток.



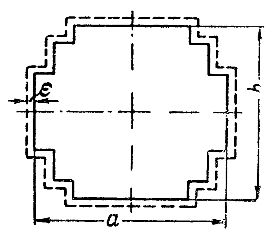




Рис. 8-4. Основной магнитный поток реактора в немагнитном зазоре.

Основной магнитный поток реактора на протяжении высоты $H$ какого-либо элемента стержня сердечника (рис. 8-4) можно считать сосредоточенным в стали этого элемента и равным $\Phi_с = B_с П_с$, где $B_с$ — средняя по активному сечению элемента индукция и $П_с$ — активное сечение стали. В промежутке между элементами сечение магнитного потока увеличивается, во-первых, потому, что полное сечение зазора, равное площади ступенчатой фигуры $П_ф$, больше активного сечения стали $\left(П_ф = \frac{П_с}{k_з} \text{ и } k_з < 1\right)$, а, во-вторых, за счет ответвления части магнитных линий в зоне зазора за пределы сечения стержня. При этом средняя индукция в зоне зазора уменьшается до величины $B_х$. Таким образом, общее сечение магнитного потока в зоне зазора увеличивается до величины

$$П_х = П_ф + П'_х, \tag{8-4}$$

или

$$П_х = \frac{П_с}{k_з} + 2\varepsilon(a + b + 2\varepsilon), \tag{8-5}$$

где размеры $a$ и $b$ взяты по рис. 8-4. Среднее уширение магнитного потока в зазоре на одну сторону $\varepsilon$ зависит от высоты элемента $H$ и размера немагнитного зазора $l_х$ и может быть найдено по формуле

$$\varepsilon = 0{,}735 l_х \lg \frac{H + l_х}{l_х}. \tag{8-6}$$

Зависимость $\varepsilon$ от $H$ и $l_x$ для некоторых значений $H$ показана на рис. 8-5.

Магнитные линии, выходящие в зоне зазора за пределы сечения стержня в пространство между внешней поверхностью стержня и внутренней поверхностью обмотки, входят в элементы стержня главным образом через его боко-

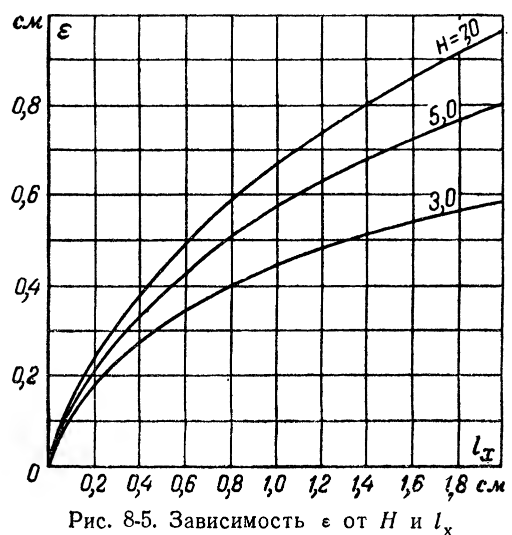



Рис. 8-5. Зависимость $\varepsilon$ от $H$ и $l_x$ [см. формулу 8-6)].

вую поверхность. Около половины этих линий входит в листы стали с торцовых поверхностей (*1*) (на рис. 8-2,*б*), а другая половина (*2*) — перпендикулярно плоскости крайних листов, что приводит к усиленному нагреву крайних листов элемента стержня вихревыми токами. Этот эффект сказывается тем сильнее, чем больше длина немагнитного зазора $l_x$. Поэтому в стержнях реакторов обычно подразделяют общий немагнитный зазор на несколько более мелких, равномерно распределенных по высоте стержня.

Постоянство величины основного потока позволяет написать:

$$B_с П_с = B_х П_х. \tag{8-7}$$

Реактор обычно рассчитывается для работы при номинальном токе агрегата. В случае короткого замыкания на электродах печи ток агрегата может увеличиться в 2,5—4 раза. При этом намагничивающая мощность, необходимая

для немагнитных зазоров, возрастает линейно с током, а намагничивающая мощность для стальных частей сердечника вследствие насыщения возрастает многократно, что приводит к уменьшению индуктивного сопротивления реактора и снижению его способности ограничивать ток короткого замыкания агрегата. В целях уменьшения влияния стальной части сердечника на величину индуктивного сопротивления в реакторах для электропечных агрегатов обычно допускают слабое насыщение стали: около 8 000 *гс* для горячекатаной стали марок Э41 и Э42 и около 9 500 *гс* для холоднокатаной стали марок Э310, Э320 и Э330.

При таком насыщении стали оказывается возможным пренебречь намагничивающей мощностью, необходимой для стальных участков, при расчете реактора на номинальный ток и рассчитывать его только по намагничивающей мощности немагнитных зазоров с учетом падения напряжения, вызванного потоком рассеяния. Реакторы, рассчитанные по этому методу, обычно дают снижение индуктивного сопротивления при коротком замыкании в пределах до 20%.

Холоднокатаная сталь, допуская более высокую индукцию, позволяет получить реактор с меньшим весом активных материалов и меньшими габаритами, но требует такой заготовки пластин для элементов стержня сердечника, чтобы осевое направление элементов совпадало с направлением прокатки листов стали. Горячекатаная сталь не требует такого совпадения. Поэтому при заготовке из нее пластин могут быть использованы практически любые отходы этой стали, лишь бы ширина полос отходов была не менее высоты элемента $H$.

Возможность варьирования размеров стального сердечника и числа и размеров немагнитных зазоров приводит к большому разнообразию возможных решений задачи расчета реактора. Опыт расчета показывает, однако, что достаточно целесообразное решение получается при выборе диаметра стержня сердечника по формуле

$$d \approx K\sqrt[4]{S'} \ [\textit{см}], \qquad (8\text{-}8)$$

где $S'$, *ква* — мощность на один стержень;

$K = 6{,}5 \div 6{,}7$ — для горячекатаной стали ($B_с = 8\,000$ *гс*);

$K = 6{,}2 \div 6{,}4$ — для холоднокатаной стали ($B_с = 9\,500$ *гс*).

После определения диаметра стержня следует произвести расчет размеров пакетов в сечении стержня с учетом места, необходимого для размещения крепежных деталей, прессующих элементы, и определить полное $П_ф$ и активное $П_с$ сечения стали, а также размеры периметра сечения $a$ и $b$ (рис. 8-4).

При предварительном расчете периметр поперечного сечения стержня для 4—6 ступеней может быть определен по приближенной формуле

$$2(a+b) \approx 3{,}6d \ [см]. \qquad (8\text{-}9)$$

Коэффициент заполнения площади круга ступенчатой фигурой в этом случае может быть взят по табл. 2-4 с уменьшением его на 0,04.

Выбор высоты элемента стержня $H$ и размера единичного зазора $l_x$ является произвольным. Обычно при проектировании серии реакторов выбирают одно значение $H$ для широкого диапазона мощностей и варьируют число и размер $l_x$ единичных зазоров при неизменном диаметре стержня $d$. Этот метод в наибольшей мере упрощает производство, позволяя обойтись небольшим числом стандартных деталей для всей серии реакторов, хотя и не всегда дает наилучшее использование активных материалов в реакторе.

При выполнении индивидуального проекта реактора предварительно задаются произвольными значениями $H$ и $l_x$ и потом в случае необходимости корректируют их, делая вторичный просчет.

В качестве исходных данных при расчете реактора для электропечного трансформатора можно рекомендовать выбирать одно из значений $H$: 3; 5 или 7 *см* и соответственно $l_x = 0{,}6$; 0,8 или 1,0 *см*.

Дальнейший расчет сердечника — определение других его размеров, веса стали, расчет потерь и тока холостого хода — производится после расчета обмоток по методам, применяемым при расчете трансформаторов (см. гл. 6). Сечение ярма в реакторах обычно принимают равным сечению стержня, так как вследствие малого насыщения стали отпадает необходимость усиления ярма.

## 8-3. РАСЧЕТ ОБМОТКИ РЕАКТОРА

При расчете числа витков реактора, как указывалось выше, можно пренебречь мощностью, необходимой для намагничивания стального сердечника, но необходимо учесть влияние, оказываемое на индуктивное сопротивление потоком рассеяния. Для этого нужно иметь возможность еще до определения числа витков и реальных размеров обмотки учесть падение напряжения $u_р = \frac{U_р 100}{U} [\%]$, вызванное потоком рассеяния обмотки.

В предварительном расчете для определения необходимого числа витков обмотки реактора можно без большой ошибки принять $u_р$ равным постоянной величине: $10\%$.

Число витков обмотки реактора может быть приближенно (так как приближенно определено $u_р$) найдено по формуле

$$w = \frac{U\left(1 - \frac{u_р}{100}\right) \cdot 10^8}{4{,}44 f B_с П_с}. \qquad (8\text{-}10)$$

Если в процессе плавки бывает необходимо отключать реактор постепенно, по ступеням, то для уменьшения падения напряжения на реакторе $U$ на его обмотке делают отпайки. Число витков на ступенях при этом рассчитывается пропорционально корню квадратному из отношения напряжений, т. е.

$$w_1 = w\sqrt{\frac{U_1}{U}},$$

где $w$ и $U$ — число витков и напряжение всей обмотки; $w_1$, $U_1$ — то же на ступени $U_1$.

После этого может быть рассчитан суммарный немагнитный зазор $nl_х$, где $n$ — число зазоров по высоте стержня.

Известно, что

$$B_х = \frac{1{,}78\,(Iw)}{nl_х} \; [гс], \qquad (8\text{-}11)$$

где $Iw$ — н. с. для немагнитного промежутка $nl_х$.

Подставляя $B_х = \frac{Ф_х}{П_х} = \frac{B_с П_с}{П_х}$ $[гс]$ в (8-11) и решая последнее относительно $nl_х$, получаем суммарный зазор:

$$nl_х = \frac{1{,}78 Iw П_х}{B_с П_с} \; [см] \qquad (8\text{-}12)$$

и число единичных зазоров:

$$n = \frac{nl_x}{l_x}. \qquad (8\text{-}13)$$

При определении $n$ для получения целого и удобного числа зазоров иногда отступают от предварительно выбранного значения $l_x$, однако так, чтобы сохранить найденное значение $nl_x$. В этом случае дополнительно корректируют число витков обмотки реактора после проверки значения $B_c$.

Дальнейший расчет обмотки реактора — размещение ее на сердечнике и расчет потерь короткого замыкания проводится так же, как и для концентрической обмотки трансформатора [Л. 3].

## *ГЛАВА ДЕВЯТАЯ*

# ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО АГРЕГАТА ЭТМ-1800/6

## 9-1. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТ АГРЕГАТА

Рассчитать трансформаторный агрегат для дуговой трехфазной сталеплавильной электропечи емкостью 3,0 *т*.

Мощность трансформатора $S = 1\,800$ *ква*.

Число фаз $m = 3$.

Частота $f = 50$ *гц*.

Напряжение ВН $U_1 = 6\,000$ *в*.

Напряжение НН $U_2 = 246 - 210 - 142 - 121$ *в*.

Схема и группа $\triangle - \curlywedge/\triangle - 12\text{-}11$.

Охлаждение — естественное масляное.

Нагрузка — длительная; длительность работы при соединении $\triangle - T_{\triangle} = 1{,}5$ *ч*, при соединении $\curlywedge - T_{\curlywedge} = 1{,}0$ *ч*.

Установка внутренняя.

Характеристики трансформатора:

Напряжение короткого замыкания $u_к = 9{,}0\%$.

Потери короткого замыкания $P_к = 24\,000$ *вт*.

Потери холостого хода $P_x = 6\,000$ *вт*.

Ток холостого хода $i_0 = 4{,}5\%$.

Трансформаторный агрегат должен быть снабжен на стороне ВН токоограничивающим реактором, встроенным в бак трансформатора и включаемым между питающей трансформатор сетью и линейными зажимами обмотки ВН трансформатора.

Падение напряжения на реакторе при номинальном токе должно составлять $u_{кр} = 20\%$ напряжения сети. Реактор должен быть снабжен отпайками для получения 70 и 50% от $u_{кр}$.

## 9-2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН (см. § 2-2)

Мощность одного стержня (фазы) $S' = \frac{S}{m} = \frac{1\,800}{3} = 600$ *ква.*

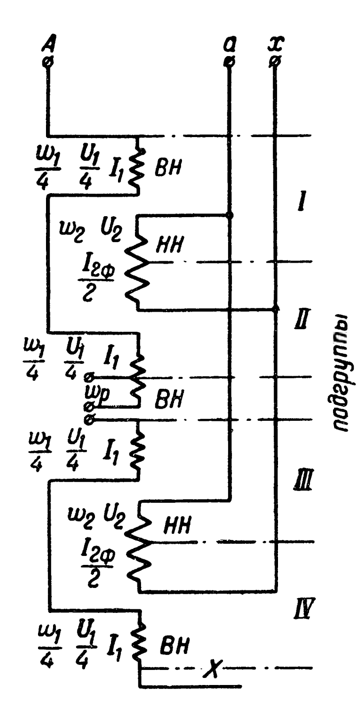



Рис. 9-1. Схема расположения и соединения обмоток на стержне.

Фазное напряжение: обмотка ВН при соединении △

$$U_{1ф} = 6\,000 \text{ в};$$

при соединении ⅄

$$U_{1ф} = \frac{6\,000}{\sqrt{3}} = 3\,460 \text{ в};$$

обмотка НН $U_{2ф} = 246$ *в* (на основной ступени).

Испытательные напряжения (см. табл. 3-1):

$$U_{1и} = 25 \text{ кв}; \; U_{2и} = 5 \text{ кв}.$$

Номинальные токи: обмотка ВН

$$I_1 = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_1} = \frac{1\,800 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6\,000} = 173{,}5 \text{ а};$$

обмотка НН

$$I_2 = \frac{1\,800 \cdot 10^3}{\sqrt{3}\,246} = 4\,220 \text{ а}.$$

Фазные токи:

$$I_{1ф} = \frac{I_1}{\sqrt{3}} = \frac{173{,}5}{\sqrt{3}} = 100 \text{ а};$$

$$I_{2ф} = \frac{I_2}{\sqrt{3}} = \frac{4\,220}{\sqrt{3}} = 2\,440 \text{ а}.$$

Трансформатор выполняется с чередующимися обмотками, число подгрупп обмотки $n = 4$ (см. табл. 2-1). Схема расположения обмоток на стержне — по рис. 9-1.

При работе на основной отпайке $X_2$ обмотки каждой подгруппы являются магнитно-уравновешенными и симметричными. После перехода на отпайку $X_4$ сохраняется магнитное равновесие в группах обмотки при некотором нарушении симметрии расположения обмоток ВН внутри каждой из двух групп. Вследствие последовательного соединения подгрупп обмотки НН указанная несимметрия не нарушит равномерного распределения токов между параллельными группами обмотки НН, хотя и приведет к некоторому увеличению напряжения рассеяния при работе на отпайке $X_4$.

## 9-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА (см. § 2-4)

Напряжение одного витка обмотки см. формулу (2-21) ориентировочно

$$u'_в \approx 0{,}85 \sqrt{S'} = 0{,}85 \sqrt{600} = 20{,}8 \ в.$$

Число витков обмотки НН

$$w'_2 = \frac{U_{2ф}}{u'_в} = \frac{246}{20{,}8} = 11{,}8;$$

принимаем $w_2 = 12$ витков.

Уточнение напряжения витка:

$$u_в = \frac{U_{2ф}}{w_2} = \frac{246}{12} = 20{,}5 \ в.$$

Выбираем согласно указаниям § 2-3 стержневую конструкцию сердечника, число ступеней — 6; прессовка стержня обмотками $k_{кр} = 0{,}92$; сталь марки Э330; $\delta = 0{,}35$ *мм*; индукция в стержне $B = 16\,500$ *гс*; междулистовая изоляция — лак; $k_з = 0{,}91$; $k_с = k_{кр}\ k_з = 0{,}92 \cdot 0{,}91 = 0{,}837$.

Диаметр стержня

$$d = \sqrt{\frac{u_в \cdot 10^8}{1{,}11 \pi f B_с k_с}} = \sqrt{\frac{20{,}5 \cdot 10^8}{1{,}11 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 16\,500 \cdot 0{,}837}};$$

$$d = 29{,}2 \ см.$$

Сечение стержня

$$П_с = \frac{\pi d^2}{4} k_с = \frac{3{,}14 \cdot 29{,}2^2 \cdot 0{,}837}{4} = 560 \ см^2.$$

Индукция:

$$B_с = \frac{u_в \cdot 10^8}{4{,}44 f П_с} = \frac{20{,}5 \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 560} = 16\,500 \ гс.$$

Средний диаметр витка двух обмоток ориентировочно

$$d_{12} \approx 1{,}42\ d = 1{,}42 \cdot 29{,}2 = 41{,}5 \ см.$$

Выбираем $\beta = 1{,}8$.

Ориентировочная высота обмотки (при наличии регулирования напряжения)

$$l \approx \frac{\pi d_{12}}{\beta} 1{,}08 = \frac{3{,}14 \cdot 41{,}5}{1{,}8} 1{,}08 = 78 \ см.$$

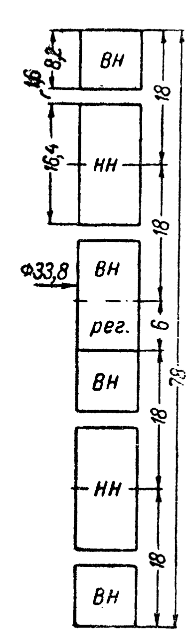


Рис. 9-2. Ориентировочные размеры обмоток.

Изоляционные расстояния (см. § 3-2, табл. 3-2) обмоток от стержня:

промежуток $a_{ц1} = 1,4$ *см*;

барьер $\delta_ц = 0,5$ *см*;

промежуток $a_{01} = 1,4 + 0,5 + 0,4 = 2,3$ *см*.

Между обмотками ВН и НН с одной стороны и стержнем устанавливается бумажно-бакелитовый цилиндр ∅ 30,0/31,0 *см*.

Между обмотками ВН и НН промежуток $a_{12} = 1,6$ *см*; барьер $\delta_{12} = 0,3$ *см*.

Внутренний диаметр обмотки

$$D'_1 = D'_2 = d + 2a_{01} = 29,2 + 2\cdot 2,3 = 33,8 \text{ см}.$$

### Ориентировочные размеры обмоток

Высота одной подгруппы обмоток

$$l_{пгр} \approx \frac{l}{1,08n} = \frac{78}{1,08\cdot 4} \approx 18 \text{ см}.$$

Высота зоны регулировочных витков

$$l_{рег} \approx l - 4l_{пгр} = 78 - 72 = 6 \text{ см}.$$

Высота обмоток ВН и НН в одной подгруппе

$$l_1 \approx l_2 \approx \frac{l_{пгр} - a_{12}}{2} = \frac{18 - 1,6}{2} = 8,2 \text{ см}.$$

Выбранные таким образом ориентировочные размеры обмоток показаны на рис. 9-2.

## 9-4. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ ОБМОТОК (см. § 4-4—4-6)

Средняя плотность тока в обмотках

$$\Delta_{ср} = 0,745k\,\frac{P_к u_в}{Sd_{12}} = 0,745\cdot 0,75\,\frac{24\,000\cdot 20,5}{1\,800\cdot 41,5} = 3,68 \text{ а/мм}^2.$$

### Расчет обмотки НН

Ток одной ветви (подгруппы) обмотки (схема на рис. 9-1)

$$I_{2в} = \frac{I_{2ф}}{2} = \frac{2\,440}{2} = 1\,220 \text{ а}.$$

Сечение витка

$$\Pi_{2в} = \frac{I_{2в}}{\Delta_{ср}} = \frac{1\,220}{3,68} = 331 \ мм^2$$

Согласно табл. 4-3 может быть применена винтовая обмотка. Предельный осевой размер провода $b$ по кривым на рис. 4-17 для $\Delta = 3,7$ *а/мм²* и $q = 1\,200$ *вт/м²* равен приблизительно 0,66 *см*, по табл. 4-4 для числа проводов (витков) в подгруппе 6 и числа подгрупп 4 (рис. 9-1) — около 0,64 *см*.

Канал между двумя витками не менее

$$h \approx 0,15\sqrt[4]{S'} = 0,15\sqrt[4]{600} = 0,74 \ см; \text{ принимаем } h_к = 0,75 \ см.$$

Число витков обмотки НН на одну фазу $w_2 = 12$. При последовательном соединении и конструктивном объединении двух подгрупп этой обмотки (рис. 9-1) число витков в одной ветви $w_{2в} = 12$, высота двух подгрупп (рис. 9-2) $2l_2 = 16,4$ *см*.

Ориентировочная высота провода [см. формулу (4-9а)]

$$b = \frac{2l_2 + h_к}{w_{2в} + 1} - h_к = \frac{2 \cdot 8,2 + 0,75}{12 + 1} - 0,75 = 0,57 \ см.$$

Выбираем сечение витка из 16 проводов (см. табл. 4-1)

$$16 \times \frac{3,8 \times 5,5}{4,3 \times 6,0}.$$

Полное сечение витка $\Pi_{2в} = 16 \cdot 20,4 = 326,4$ *мм²*.

Плотность тока

$$\Delta_2 = \frac{I_{2в}}{\Pi_{2в}} = \frac{1\,220}{326,4} = 3,74 \ а/мм^2.$$

Осевой размер подгруппы [см. формулу (4-12а)]

$$l_2 = 0,5\,[b'(w_{2в} + 1) + kh_к(w_{2в} - 1)] = 0,5\,[0,6\,(12 + 1) + $$
$$+ 0,95 \cdot 0,75\,(12 - 1)] \approx 7,85 \ см.$$

Радиальный размер обмотки

$$l_{2р} = 16 \cdot 0,43 = 6,88 \approx 6,9 \ см.$$

Диаметры обмотки: внутренний $D_2' = 33,8$ *см*; $D_2'' = D_2' + 2l_{2р} = 33,8 + 2 \cdot 6,9 = 47,6$ *см*.

Число междувитковых прокладок по окружности обмотки 10, ширина прокладки $b = 5$ *см* (см. § 4-2).

## Расчет обмотки ВН

На обмотке ВН предусматривается возможность изменения числа витков для регулирования напряжения на обмотке НН. Выбираем спиральную катушечную обмотку (см. табл. 4-3). Изоляция обмотки от ярма и между обмотками соседних стержней (см. табл. 3-2): от ярма

промежуток $l_0 = 3{,}6$ *см*;

барьер $\delta_ш = 0{,}3$ *см*;

размер $l_{оц} = 2{,}0$ *см*;

между обмотками:

промежуток $a_{22} = 2{,}0$ *см*;

барьер $\delta_{22} = 0{,}3$ *см*.

Обмотка ВН выполняется с регулировочными отпайками. Схема регулирования — по рис. 9-3.

Число витков обмотки ВН (при соединении в треугольник): на основной отпайке

$$w_1 = w_2 \frac{U_1}{U_2} = 12 \frac{6\,000}{246} = 292 \text{ витка};$$

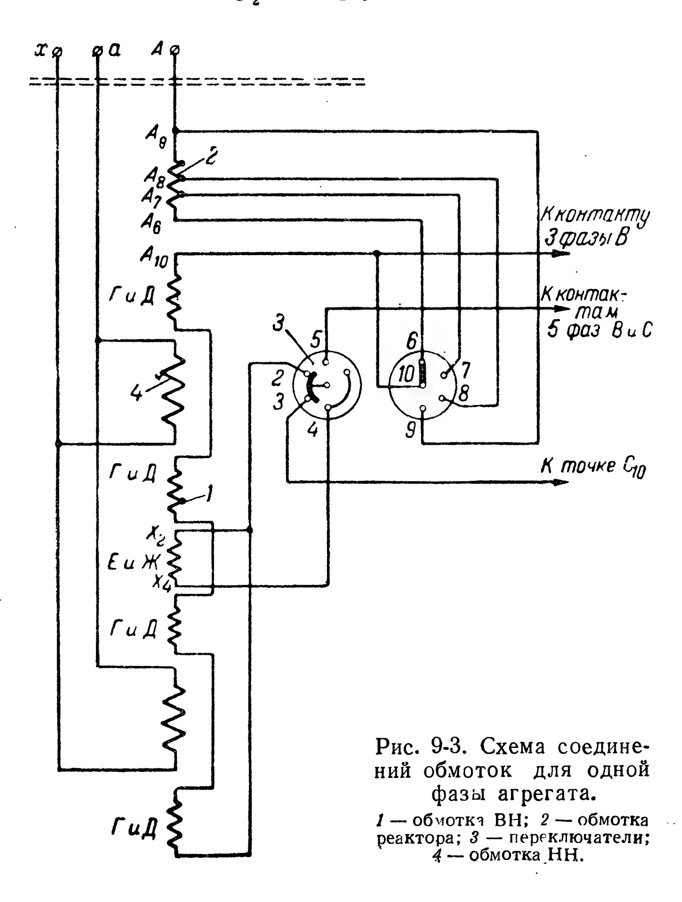



Рис. 9-3. Схема соединений обмоток для одной фазы агрегата.

*1* — обмотка ВН; *2* — обмотка реактора; *3* — переключатели; *4* — обмотка НН.

на второй отпайке

$$w_1' = 12\frac{6\,000}{210} = 342 \text{ витка.}$$

Число витков в одной подгруппе (ветви) по рис. 9-1.

$$w_{1в} = \frac{w_1}{4} = \frac{292}{4} = 73 \text{ витка.}$$

Плотность тока

$$\Delta_1' \approx 2\Delta_{ср} - \Delta_2 = 2\cdot 3{,}68 - 3{,}74 = 3{,}58 \; а/мм^2.$$

Ориентировочное сечение витка

$$П_{1в}' = \frac{I_{1в}}{\Delta_1'} = \frac{100}{3{,}58} = 28 \; мм^2.$$

Выбираем два параллельных провода ($n_{1в} = 2$):

$$2\times\frac{2{,}44\times 5{,}9}{2{,}94\times 6{,}4}; \quad П_{1в} = 2\cdot 13{,}9 = 27{,}8 \; мм^2.$$

Плотность тока

$$\Delta_1 = \frac{100}{27{,}8} = 3{,}6 \; а/мм^2.$$

Число витков в катушке ($l_{1р}' = l_{2р}$)

$$w_{1к} = \frac{10 l_{1р}'}{n_{1в} a'} = \frac{10\cdot 6{,}9}{2\cdot 2{,}94} \approx 12.$$

Принимаем в каждой подгруппе:

5 катушек $Г \times 12$ витков = 60 витков

1 катушка $Д \times 13$ витков = 13 витков

Всего 6 катушек $Г$ и $Д$ (73 витка). На стержне 4 подгруппы 24 катушки, 292 витка. Дополнительные витки для регулирования напряжения $w_р = w_1' - w_1 = 342 - 292 = 50$ витков располагаются в четырех катушках:

2 катушки $Е \times 13$ витков = 26 витков

2 катушки $Ж \times 12$ витков = 24 витка

Всего на стержень 4 катушки (50 витков). Регулировочные катушки наматываются из того же провода, что и основные. Схема регулирования показана на рис. 9-3. В табл. 9-1 приведены основные данные обмотки ВН при регулировании напряжения.

Рабочее напряжение катушки

$$20{,}5 \times 13 = 266{,}5 \; в < 800 \; в.$$

Таблица 9-1

## К расчету обмотки ВН

| Напряжение НН, *в* | Схема соединений обмоток ВН | Положение переключателей (замкнуты контакты) | Включены* катушки ВН | Коэффициенты трансформации | | Число витков обмоток ВН | Ток обмотки ВН $I_{1ф}$, *а* | Мощность трансформатора $S$, *ква* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | линейный $k_л$ | фазный $k_ф$ | | | |
| 246 | △ | 2—3 | *Г* и *Д* | $\frac{6\,000}{246}=24,4$ | $\frac{6\,000}{246}=24,4$ | $12\frac{6\,000}{246}=292$ | 100,0 | 1 800 |
| 210 | △ | 3—4 | *Г*, *Д*, *Е* и *Ж* | $\frac{6\,000}{210}=28,6$ | $\frac{6\,000}{210}=28,6$ | $12\frac{6\,000}{210}=342$ | $100\frac{210}{246}=85,4$ | $1\,800\frac{210}{246}=1\,535$ |
| 142 | ⅄ | 2—5 | *Г* и *Д* | $\frac{6\,000}{142}=42,3$ | $\frac{6\,000}{\sqrt{3}\cdot 142}=24,4$ | $12\frac{6\,000}{\sqrt{3}\cdot 142}=292$ | 100,0 | $1\,800\frac{142}{246}=1\,040$ |
| 121 | ⅄ | 4—5 | *Г*, *Д*, *Е* и *Ж* | $\frac{6\,000}{121}=49,6$ | $\frac{6\,000}{\sqrt{3}\cdot 121}=28,6$ | $12\frac{6\,000}{\sqrt{3}\cdot 121}=342$ | $100\frac{210}{246}=85,4$ | $1\,800\frac{121}{246}=885$ |

* См. схему на рис. 9-3.

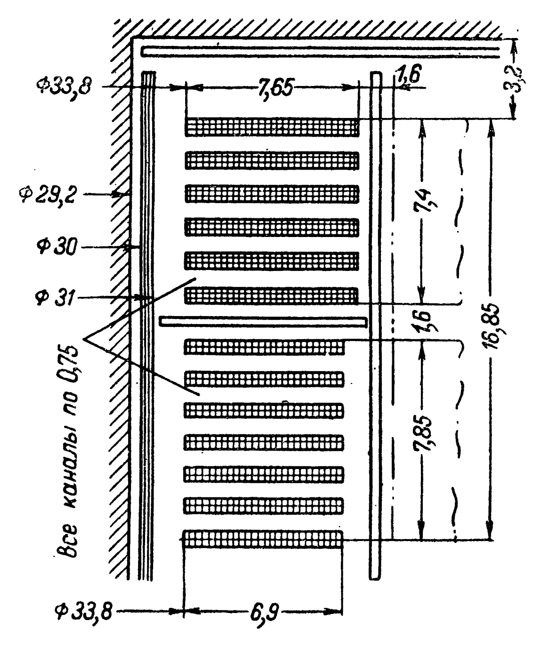


Рис. 9-4. Основные размеры обмоток ВН и НН (одна подгруппа).

Высота междукатушечных каналов $h_к = 0{,}75$ *см*. Осевой размер одной подгруппы

$$l_1 = n_{1к} b' + (n_{1к} - 1) h_к k = 6 \cdot 0{,}64 + (6 - 1)\, 0{,}75 \cdot 0{,}95 \approx 7{,}4 \text{ см}.$$

Общий осевой размер четырех регулировочных катушек

$$l_{1\,рег} = 4 \cdot 0{,}64 + 3 \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}95 \approx 4{,}7 \text{ см}.$$

Радиальный размер обмотки

$$l_{1р} = n_{1в}\, a' w_{1к} = 2 \cdot 0{,}294 \cdot 13 = 7{,}65 \text{ см}.$$

Внутренний диаметр обмотки

$$D'_1 = D'_2 = 33{,}8 \text{ см}.$$

Наружный диаметр

$$D''_1 = D'_1 + 2 l_{1р} = 33{,}8 + 2 \cdot 7{,}65 = 49{,}1 \text{ см}.$$

Общий осевой размер обмотки на стержне

$$l = n_{пгр} (l_1 + l_2) + l_{1рег} + [n_{пгр} a_{12} + h_к (n_{пгр} - 1 + 1)]\, k =$$
$$= 4\,(7{,}4 + 7{,}85) + 4{,}7 + [4 \cdot 1{,}6 + 0{,}75 \cdot 4]\, 0{,}95 \approx 74{,}5 \text{ см};$$

принимаем $l = 75$ *см*.

Длина цилиндра между обмотками и стержнем

$$l_ц = l + 2l_{оц} = 75 + 2 \cdot 2 = 79 \ см.$$

Основные размеры обмоток ВН и НН в одной подгруппе показаны на рис. 9-4.

## 9-5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИХ СИЛ В ОБМОТКАХ (см. гл. 5)

**Обмотка ВН.**

Вес меди обмотки (катушки *Г* и *Д*)

$$G_{1м} = 28cD_{1ср}n_{1в}w_{1в}П_{1в} \cdot 10^{-5} =$$

$$= 28 \cdot 3 \cdot 41{,}45 \cdot 1 \cdot 293 \cdot 27{,}8 \cdot 10^{-5} = 283 \ кг.$$

Катушки *Е* и *Ж*

$$G_{1\ рег} = 28 \cdot 3 \cdot 41{,}45 \cdot 1 \cdot 50 \cdot 27{,}8 \cdot 10^{-5} = 48{,}3 \ кг.$$

Электрические потери (при номинальной мощности)

$$P_{1э} = 2{,}4\Delta^2 G_{1м} = 2{,}4 \cdot 3{,}6^2 \cdot 283 = 8\,800 \ вт.$$

Добавочные потери:

$$k_{1д} = 1 + b^4\beta \frac{n^2 - 0{,}2}{10} = 1 + 0{,}59^4 \cdot 0{,}167 \frac{6^2 - 0{,}2}{10} = 1{,}073;$$

$$\beta = \left(\frac{am}{l_р} k_р\right)^2 = \left(\frac{0{,}244 \cdot 24}{7{,}65} 0{,}533\right)^2 = 0{,}167.$$

**Потери в отводах ВН**

Длина отводов

$$l_{1от} \approx 4lnc = 4 \cdot 75 \cdot 1 \cdot 3 = 900 \ см.$$

Сечение отвода принимаем равным сечению витка, т. е. 27,8 $мм^2$.
Вес отводов

$$G_{1от} = l_{1от}П_{1от} \ \gamma_м \cdot 10^{-5} = 900 \cdot 27{,}8 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} = 2{,}23 \ кг.$$

Потери

$$P_{1от} = 2{,}4\Delta^2_{1от}G_{1от} = 2{,}4 \cdot 3{,}6^2 \cdot 2{,}23 \approx 70 \ вт.$$

Плотность теплового потока [см. формулу (4-15)]

$$q_1 = 1{,}07 \frac{\Delta_1 I_{1в} w_к k_д}{(l_{1р} + b')\,k} =$$

$$= 1{,}07 \frac{3{,}6 \cdot 100 \cdot 13 \cdot 1{,}075}{(7{,}65 + 0{,}64)\,0{,}75} = 870 \ вт/м^2.$$

**Обмотка НН**

Вес меди обмотки

$$G_{2м} = 28 \cdot 3 \cdot 40{,}7 \cdot 2 \cdot 12 \cdot 326{,}4 \cdot 10^{-5} = 268{,}5 \ кг.$$

Электрические потери:

$$P_{2э} = 2{,}4\Delta_2^2 G_{2м} = 2{,}4 \cdot 3{,}74^2 \cdot 268{,}5 = 9\,020 \ вт.$$

Добавочные потери:

$$k_{2д} = 1 + 0{,}55^4 \cdot 0{,}220 \ \frac{6^2 - 0{,}2}{10} = 1{,}073;$$

$$\beta = \left(\frac{0{,}38 \cdot 16}{6{,}9} 0{,}533\right)^2 = 0{,}220.$$

Плотность теплового потока

$$q_2 = 1{,}07 \frac{3{,}74 \cdot 1\,220 \cdot 1{,}075}{(6{,}9 + 0{,}55)\,0{,}75} = 940 \ вт/м^2.$$

Потери в отводах. Отводы по схеме на рис. 9-1 — одна пара шин на фазу.

Общая длина шин на три фазы

$$l_{2от} \approx 4lnc = 4 \cdot 75 \cdot 1 \cdot 3 = 900 \ см.$$

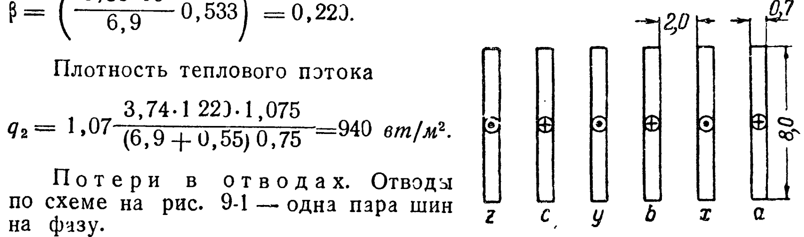


Рис. 9-5. К расчету добавочных потерь в шинах отводов НН.

Сечение шины отводов (см. табл. 4-7) при токе $I_{2ф} = 2\,440$ *а*

$$0{,}7 \times 8{,}0 \ см; \ \Pi_{2от} = 560 \ мм^2.$$

Вес отводов НН ориентировочно

$$G_{2от} = l_{2от}\Pi_{2от}\gamma_м \cdot 10^{-5} = 900 \cdot 560 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-5} \approx 45 \ кг.$$

Плотность тока

$$\Delta_{2от} = \frac{I_{2ф}}{\Pi_{2от}} = \frac{2\,440}{560} = 4{,}35 \ а/мм^2.$$

Потери

$$P_{2от} = 2{,}4\Delta_{2от}^2 G_{2от} = 2{,}4 \cdot 4{,}35^2 \cdot 45 = 2\,040 \ вт.$$

Добавочные потери в отводах [рис. 9-5, см. формулу (5-17)];

$$k_{2д} = 1 + \frac{\delta^4\beta}{200} = 1 + \frac{0{,}7^4 \cdot 0{,}9}{200} \approx 1{,}0;$$

$$\beta \approx \left(\frac{l_p}{l_p + 0{,}6\delta}\right)^2 = \left(\frac{8{,}0}{8{,}0 + 0{,}6 \cdot 0{,}7}\right)^2 \approx 0{,}9.$$

Потери от потока рассеяния в элементах конструкции [см. формулу (5-18)];

$$P_б = \frac{k_б}{100}(P_{1э} + P_{2э} + P_{1от} + P_{2от}) =$$

$$= 0{,}16\,(9\,020 + 8\,800 + 70 + 2\,040) \approx 3\,200 \; вт;$$

$$M = \frac{S \cdot 10^3}{3n^2U_в^2} = \frac{1\,800 \cdot 10^3}{3 \cdot 1 \cdot 246^2} \approx 10.$$

По табл. 5-2

$$k_б = 16{,}0.$$

Полные потери короткого замыкания

$$P_к = P_{1э}k_{1д} + P_{2э}k_{2д} + P_{1от} + P_{2от} + P_б =$$

$$= 8\,800 \cdot 1{,}073 + 9\,020 \cdot 1{,}073 + 70 + 2\,040 + 3\,200 = 24\,430 \; вт.$$

Отклонение от заданной величины

$$\Delta P_к = \frac{24\,430 - 24\,000}{24\,000}\,100 = +1{,}9\%.$$

Полные потери агрегата

$$P_{к.т} + P_{к.р} = 24\,430 + 3\,850 = 28\,280 \; вт.$$

Вес меди трансформатора

$$G_{м.т} = G_{1м} + G_{2м} + G_{1от} + G_{2от} =$$

$$= 283 + 48{,}3 + 268{,}5 + 2{,}23 + 45 = 647 \; кг.$$

Полный вес меди агрегата—трансформатора и реактора

$$G_{м.т} + G_{м.р} = 647 + 121 = 768 \; кг.$$

## Напряжение короткого замыкания

Активная составляющая для трансформатора

$$u_а = \frac{P_к}{10S} = \frac{24\,460}{10 \cdot 1\,800} = 1{,}36\%.$$

Активная составляющая для агрегата

$$u_а = \frac{28\,280}{10 \cdot 1\,800} = 1{,}57\%.$$

Реактивная составляющая [см. формула (5-29)] для обмоток

$$u_{р.обм} = \frac{7{,}92 f \omega I_н \pi d_{12} a_р k_р}{n u_в l_р}\,10^{-6} =$$

$$= \frac{7{,}92 \cdot 50 \cdot 12 \cdot 2\,440 \cdot 3{,}14 \cdot 41{,}1 \cdot 6{,}33 \cdot 0{,}533}{4 \cdot 20{,}5 \cdot 7{,}3}\,10^{-6} = 8{,}45\%;$$

$$d_{12}=D_1'+\frac{l_{1p}+l_{2p}}{2}=33,8+\frac{7,65+6,9}{2}=41,1 \text{ см};$$

$$a_p=a_{12}+\Delta_p k_p+\Delta_m k_m+\frac{a_1+a_2}{3}=$$

$$=1,6+0,80\cdot 1,53+0,80\cdot 1,53+\frac{6\cdot 0,59+6\cdot 0,55}{3}=6,33 \text{ см}$$

(канал между катушками „от меди до меди" — 0,8 *см*).

$$k_p=1-\sigma\left(1-e^{-\frac{1}{\sigma}}\right)\left[1-0,5e^{-sk}\left(1-e^{-\frac{1}{\sigma}}\right)\right];$$

$$\sigma=\frac{a_{12}+a_1+a_2+\Sigma\Delta_p+\Sigma\Delta_m}{\pi l_p}=$$

$$=\frac{1,6+6\cdot 0,59+6\cdot 0,55+5\cdot 0,8+5\cdot 0,8}{3,14\cdot 7,3}=0,716;$$

$$k=\frac{2}{l_p\sigma}=\frac{2}{7,3\cdot 0,716}=0,382;$$

$$s=\frac{D_1'-d'}{2}=\frac{33,8-0,965\cdot 29,2}{2}=2,8 \text{ см}$$

(по табл. 5-4 при шести ступенях $d'=0,965d$);

$$sk=2,8\cdot 0,382=1,07.$$

По формуле (5-34) или кривым на рис. 5-16

$$k_p=0,533.$$

Индуктивность отводов НН [см. формулу (5-40)] (рис. 9-5)

$$x_{20}=\frac{7,9f\,(d+\delta/3)\,k_p\cdot 10^{-8}}{l_p}\cdot\frac{n+1}{2n^2}=$$

$$=\frac{7,9\cdot 50\left(2+\frac{0,7}{3}\right)0,9\cdot 10^{-8}}{8}\cdot\frac{1+1}{2\cdot 1}\approx 1\cdot 10^{-6} \text{ ом/см}.$$

По рис. 9-5

$$\sigma=\frac{d+\delta}{\pi l_p}=\frac{2+0,7}{3,14\cdot 8}=0,107;$$

$$k=\frac{2\pi}{d+\delta}=\frac{2\cdot 3,14}{2+0,7}=2,32;\ s=8,0;\ sk=2,32\cdot 8=18,6.$$

По рис. 5-16 $k_p \approx 0{,}9$. Для одной фазы $n = 1$.

$$x_{2от} = l_{2от} x_{2о} \approx 2 l x_{2о} = 2 \cdot 75 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 1{,}5 \cdot 10^{-4} \text{ ом};$$

$$u_{рот} = \frac{x_{2от} I_{2ф}}{U_{2н}} = \frac{1{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 2\,440}{246} \approx 0{,}15\%.$$

Реактивная составляющая $u_к$:

$$u_р = u_{р.обм} + u_{р.от} = 8{,}45 + 0{,}15 = 8{,}6\%;$$

$$u_к = \sqrt{u_а^2 + u_р^2} = \sqrt{1{,}36^2 + 8{,}6^2} = 8{,}7\%.$$

Отклонение от заданной величины

$$\Delta u_к = \frac{8{,}7 - 9{,}0}{9{,}0} 100 = -3{,}3\%.$$

Напряжение короткого замыкания установки (ориентировочно)

$$u_{к.уст} = u_к + u_{к.р} + u_{к.с} = 8{,}7 + 20 + 7 = 35{,}7\% \quad \text{(см. табл. 1-3).}$$

Ток короткого замыкания:
установившийся со стороны ВН (фазный)

$$I_{к.у} = I_{1н} \frac{100}{u_{к.уст}} = 100{,}0 \frac{100}{35{,}7} = 280 \text{ а};$$

максимальное мгновенное значение

$$i_{к.м} = 1{,}41 k_м I_{к.у} = 1{,}41 \cdot 1{,}87 \cdot 280 = 738 \text{ а};$$

$$k_м = 1 + e^{-\frac{\pi u_а}{u_р}} = 1 + e^{-\frac{3{,}14 \cdot 1{,}57}{35{,}6}} = 1{,}87.$$

Температура обмотки ВН через 5 *сек* после возникновения короткого замыкания

$$\vartheta_к = \frac{670 t_к}{12{,}5 \left(\frac{u_к}{\Delta_2}\right)^2 - t_к} + \vartheta_н = \frac{670 \cdot 5}{12{,}5 \left(\frac{35{,}7}{3{,}6}\right)^2 - 5} + 90 \approx 93^\circ \text{ C}.$$

Время, в течение которого обмотка достигает 250° С,

$$t_{к250} \approx 2{,}5 \left(\frac{u_к}{\Delta_2}\right)^2 = 2{,}5 \left(\frac{35{,}7}{3{,}6}\right)^2 = 246 \text{ сек}.$$

Механические силы в обмотках при коротком замыкании [см. формулу (5-51)]

$$F_{ос} = \frac{6{,}4 (i_{км} w)^2 l_в k_p}{n^2 l_р} 10^{-8} =$$

$$= \frac{6{,}4 (738 \cdot 292)^2 \, 3{,}14 \cdot 41{,}1 \cdot 0{,}533}{4^2 \cdot 7{,}3} 10^{-8} = 1\,750 \text{ кг};$$

$$\sigma_{сж}=\frac{F_{о.с}}{nl_{р}b}=\frac{1\,750}{10\cdot 7{,}3\cdot 5}=5\ кг/см^2<200\ кг/см^2.$$

Наибольшее усилие на катушке ВН

$$F=\frac{F_{о.с}\frac{2m-1}{m^2}}{n}=\frac{1\,750\frac{2\cdot 6-1}{6^2}}{10}=53{,}5\ кг.$$

Максимальный изгибающий момент

$$M_{макс}=\frac{Fl}{12}=\frac{53{,}5\cdot 7{,}9}{12}=35{,}3\ кг\cdot см;$$

$$l=\frac{\pi D_{ср}}{n}-b=\frac{3{,}14\cdot 41{,}1}{10}-5=7{,}9\ см.$$

Максимальное напряжение на изгиб

$$\sigma_{и}=\frac{M_{макс}}{W}=\frac{35{,}3}{0{,}17}=208\ кг/см^2;$$

$$W=\frac{w_{к}ab^2}{6}=\frac{12\cdot 0{,}244\cdot 0{,}59^2}{6}=0{,}17\ см^3.$$

## 9-6. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ (см. гл. 6)

Определение размеров пакетов:

$$a_1=0{,}955\cdot 29{,}2=27{,}9\approx 28{,}0\ см;$$
$$a_2=0{,}870\cdot 29{,}2=25{,}4\approx 25{,}4\ см;$$
$$a_3=0{,}770\cdot 29{,}2=22{,}5\approx 22{,}4\ см;$$
$$a_4=0{,}640\cdot 29{,}2=18{,}7\approx 18{,}6\ см;$$
$$a_5=0{,}495\cdot 29{,}2=14{,}45\approx 14{,}6\ см;$$
$$a_6=0{,}300\cdot 29{,}2=8{,}75\approx 8{,}6\ см.$$

Толщина пакетов, найденная из прямоугольных треугольников, образованных радиусом окружности и половиной ширины пакета.

Площадь пакетов:

$$b_1=4{,}0\ см;\qquad П_{п1}=2\cdot 28{,}0\cdot 4{,}0=224{,}0;$$
$$b_2=3{,}1\ см;\qquad П_{п2}=2\cdot 25{,}4\cdot 3{,}1=157{,}5;$$
$$b_3=2{,}2\ см;\qquad П_{п3}=2\cdot 22{,}4\cdot 2{,}2=98{,}5;$$
$$b_4=1{,}9\ см;\qquad П_{п4}=2\cdot 18{,}6\cdot 1{,}9=70{,}6;$$
$$b_5=1{,}4\ см;\qquad П_{п5}=2\cdot 14{,}6\cdot 1{,}4=40{,}9;$$
$$b_6=1{,}3\ см;\qquad П_{п6}=2\cdot 8{,}6\cdot 1{,}3=22{,}4$$

$$П_{фс}=\Sigma П_{п}=613{,}9\ см^2$$

Сечение стержня см. рис. 9-6.
Активное сечение стержня

$$\Pi_{с} = k_з \Pi_{фс} = 0{,}91 \cdot 613{,}9 = 558{,}6 \ см^2.$$

Сечение ярма прямоугольное

$$\Pi'_{фя} = \Pi_{фс} = 614 \ см^2;$$

ширина ярма

$$b_я = 2\Sigma b_п = 2 \cdot 13{,}9 = 27{,}8 \ см;$$

высота ярма

$$h_я = \frac{\Pi_{фя}}{b_я} = \frac{614}{27{,}8} = 22{,}1 \ см.$$

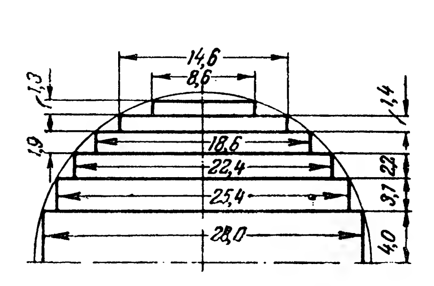


Рис. 9-6. Сечение стержня трансформатора ЭТМ-1800/6.

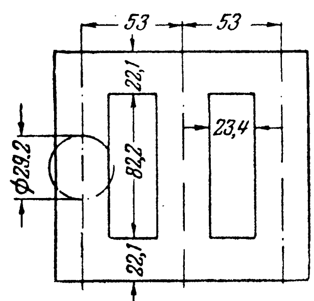


Рис. 9-7. Основные размеры сердечника трансформатора ЭТМ-1800/6.

Полное сечение ярма

$$\Pi_{фя} = b_я h_я = 27{,}8 \cdot 22{,}1 = 614 \ см^2;$$

активное сечение

$$\Pi_я = k_з \Pi_{фя} = 0{,}91 \cdot 614 = 558{,}6 \ см^2.$$

Индукция в стержне и ярме при соединении обмотки ВН в треугольник

$$B_{с\Delta} = B_{я\Delta} = \frac{u_в \cdot 10^8}{4{,}44 f \Pi_с} = \frac{20{,}5 \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 558{,}6} = 16\,520 \ гс;$$

при соединении в звезду

$$B_{с\curlywedge} = B_{я\curlywedge} = \frac{B_{с\Delta}}{\sqrt{3}} = \frac{16\,520}{\sqrt{3}} = 9\,550 \ гс.$$

Размеры сердечника
Длина стержня

$$l_с = l + 2l_0 = 75 + 2 \cdot 3{,}6 = 82{,}2 \ см,$$

расстояние между осями стержней

$$C = D_1'' + 2a_{22} = 49{,}1 + 2 \cdot 2{,}0 = 53{,}1 \approx 53{,}0 \ \text{см}.$$

Основные размеры сердечника см. рис. 9-7.

Вес стали в стержнях

$$G_с = c\Pi_с l_с 7{,}6 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 558{,}6 \cdot 82{,}2 \cdot 7{,}6 \cdot 10^{-3} = 1\,050 \ \text{кг};$$

в ярмах

$$G_я' = 2(c-1) C\Pi_я \gamma_с \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 2 \cdot 53{,}0 \cdot 558{,}6 \cdot 7{,}6 \cdot 10^{-3} = 898 \ \text{кг};$$

$$G_я'' = 15{,}2 \Pi_с h_я \cdot 10^{-3} = 15{,}2 \cdot 558{,}6 \cdot 22{,}1 \cdot 10^{-3} \approx 188 \ \text{кг};$$

$$G_я = G_я' + G_я'' = 898 + 188 = 1\,086 \ \text{кг}.$$

Полный вес стали

$$G_{ст} = G_с + G_я = 1\,050 + 1\,086 = 2\,136 \ \text{кг}.$$

Потери холостого хода при соединении ВН в треугольник для холоднокатаной стали (прямоугольные листы) по табл. 6-3 $p_х = 0{,}8 \times 2{,}9 = 2{,}32$ *вт/кг*.

| Участок | Вес участка, *кг* | Индукция *B*, *гс* | Удельные потери, *вт/кг* | Полные потери, *вт* |
|---|---|---|---|---|
| $G_с$ | 1 050 | $B_с$=16 520 | 2,32 | 2 436 |
| 1,5 $G_я''$ | 282 | $B_с$=16 520 | 2,32·1,4 | 915 |
| 1,5 $G_я''$ | 282 | $B_я$=16 520 | 2,32·1,4 | 915 |
| $G_я'-2G_я''$ | 522 | $B_я$=16 520 | 2,32 | 1 210 |

**Общий** вес 2 136 *кг* $\Sigma P_х$=5 476 *вт*

Потери холостого хода

$$P_х = k_д \Sigma P_х = 1{,}05 \cdot 5\,476 = 5\,750 \ \text{вт}.$$

Отклонение от заданной величины

$$\Delta P_х = \frac{5\,750 - 6\,000}{6\,000} 100 = -4{,}16\%.$$

Потери при соединении обмотки ВН в звезду

$$B_{с\lambda} = B_{я\lambda} = 9\,550 \ \text{гс}; \ p_х = 0{,}833 \ \text{вт/кг}.$$

Поскольку $B_с = B_я$, нет необходимости вторично производить расчет по участкам:

$$P_{х\lambda} = P_х \frac{0{,}74}{2{,}32} = 5\,750 \frac{0{,}74}{2{,}32} = 1\,835 \ \text{вт}.$$

Ток холостого хода
Активная составляющая:

$$I_{x.a}=\frac{P_x}{mU_{1ф}}=\frac{5\,750}{3\cdot 6\,000}=0{,}32\ a$$

(фазное значение);

$$i_{oa}=\frac{P_x}{10S}=\frac{5\,750}{10\cdot 1\,800}=0{,}32\%.$$

Реактивная составляющая:

$$Q_x=q_cG_c+q_яG_я+n_зq_зП_c=28{,}7\cdot 0{,}9\cdot 1\,050+$$
$$+28{,}7\cdot 0{,}9\cdot 1\,086+7\cdot 3{,}21\cdot 558{,}6=67\,750\ ва;$$

$$I_{x.p}=\frac{Q_x}{mU_{1ф}}=\frac{67\,750}{3\cdot 6\,000}=3{,}77\ a$$

(фазное значение);

$$i_{op}=\frac{Q_x}{10S}=\frac{67\,750}{10\cdot 1\,800}=3{,}77\%.$$

Ток холостого хода:

$$I_x=\sqrt{I_{x.a}^2+I_{x.p}^2}=\sqrt{0{,}32^2+3{,}77^2}\approx 3,$$

$$i_0=\sqrt{i_{oa}^2+i_{op}^2}\approx 3{,}78\%.$$

## 9-7. РАСЧЕТ РЕАКТОРА

Реактор рассчитывается для включения „в линию".
Номинальный ток $I=I_1=173{,}5\ a$.
Номинальное напряжение

$$U=\frac{u_{кр}U_1}{100\sqrt{3}}=\frac{20\cdot 6\,000}{100\sqrt{3}}=694\ в.$$

Номинальная мощность

$$S=3IU\cdot 10^{-3}=3\cdot 173{,}5\cdot 694\cdot 10^{-3}=360\ ква.$$

Мощность на один стержень

$$S'=\frac{S}{c}=\frac{360}{3}=120\ ква.$$

Диаметр стержня

$$d\approx 6{,}3\sqrt[4]{120}=20{,}8\ см;$$

принимаем $d=21$ *см*.

Выбираем сечение стержня с пятью ступенями; сталь—марки Э330; $\delta=0{,}35$ *мм*; междулистовая изоляция — лак; коэффициент заполнения $k_з=0{,}91$; индукция $B_c=9\,500$ *гс*.

Подбираем размеры пакетов в сечении стержня (рис. 9-8):

$$\begin{aligned} 12,6 \times 1,1 &= 13,90 \\ 15,1 \times 1,6 &= 24,15 \\ 17,6 \times 1,6 &= 28,15 \\ 19,4 \times 1,8 &= 34,95 \\ 20,6 \times 2,4 &= 49,40 \\ & \overline{150,55} \text{ см}^2 \end{aligned}$$

Сечение фигуры

$$\Pi_ф = 2 \cdot 150,55 = 301,1 \text{ см}^2$$

$$k_{кр} = \frac{\Pi_ф 4}{\pi d^2} = \frac{301,1 \cdot 4}{\pi 21^2} = 0,87.$$

Активное сечение стали

$$\Pi_с = k_з \Pi_ф = 0,91 \cdot 301,1 = 274 \text{ см}^2.$$

Периметр поперечного сечения стержня

$$2(a + b) = 2(20,6 + 17,0) = 75,2 \text{ см}.$$

По табл. 3-6 и рис. 3-8 выбираем изоляционные расстояния:

для $U_{исп} = 25$ *кв* $a_{01} = 1,5$ *см*; $\delta_{01} = 0,4$ *см*; $a_{ц1} = 0,6$ *см*: $l_{ц1} = 1,8$ *см*; $l_{01} = 3,0$ *см*; $a_{11} = 1,0$ *см*; $\delta_{11} = 0,2$ *см*.

Проводим предварительный расчет числа витков обмотки.

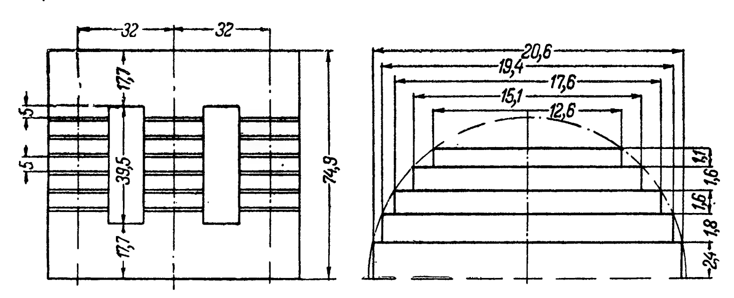



Рис. 9-8. Основные размеры сердечника и поперечного сечения стержня реактора.

Задаемся высотой элемента сердечника $H = 5,0$ *см* и размером единичного немагнитного зазора $l_x = 0,8$ *см*.

Далее, находим:

$$\varepsilon = 0,735 l_x \lg \frac{H + l_x}{l_x} = 0,51 \text{ см}$$

(по кривой на рис. 8-5).

$$\Pi'_x = 2\varepsilon(a + b + 2\varepsilon) = 2 \cdot 0,51 (37,6 + 1,02) = 39,4 \text{ см}^2;$$

$$\Pi_x = \frac{\Pi_с}{k_з} + \Pi'_x = \frac{274}{0,91} + 39,4 = 340,5 \text{ см}^2.$$

Число витков обмотки

$$w=\frac{U\left(1-\frac{u_p}{100}\right)\cdot 10^8}{4{,}44fB_c\Pi_c}=\frac{694\left(1-\frac{10}{100}\right)\cdot 10^8}{4.44\cdot 50\cdot 9\,500\cdot 274}\approx 109 \text{ витков.}$$

Суммарный немагнитный зазор

$$nl_x=\frac{1{,}78Iw\Pi_x}{B_c\Pi_c}=\frac{1{,}78\cdot 173{,}5\cdot 109\cdot 340{,}5}{9\,500\cdot 274} 4{,}41 \textit{ см.}$$

Принимаем $l_x = 0{,}75$ *см*; $n = 6$; $nl_x$ при этом увеличивается до 4,5 *см*. Вследствие этого увеличиваем число витков до $w = 110$. Высота стержня сердечника (рис. 9-8)

$$l_c = 2\cdot 5{,}0 + 5H + nl_x = 2\cdot 5{,}0 + 5\cdot 5{,}0 + 4{,}5 = 39{,}5 \textit{ см.}$$

Высота обмотки

$$l = l_c - 2l_0 = 39{,}5 - 2\cdot 3{,}0 = 33{,}5 \textit{ см.}$$

Ток обмотки $I = 173{,}5a < 300\,a$, поэтому выбираем непрерывную спирально-катушечную обмотку (см. табл. 4-3). Задаемся плотностью тока $\Delta'=4{,}0$ *а/мм²*. Ориентировочное сечение провода

$$\Pi=\frac{I}{\Delta'}=\frac{173{,}5}{4{,}0}=43{,}6 \textit{ мм}^2.$$

По сортаменту табл. 4-1а выбираем провод марки ПББО

$$2\times\frac{a\times b}{a'\times b'}=2\times\frac{3{,}8\times 6{,}4}{4{,}3\times 6{,}9};$$

$$\Pi = 2\cdot 23{,}8 = 47{,}6 \textit{ мм}^2.$$

Плотность тока

$$\Delta=\frac{173{,}5}{47{,}6}=3{,}65 \textit{ а/мм}^2.$$

Число катушек в обмотке

$$n_к=\frac{l+h_к}{b'+h_к}=\frac{33{,}5+0{,}4}{0{,}69+0{,}4}\approx 30,$$

где $h_к = 0{,}4$ *см* — высота канала между катушками. Распределение витков по катушкам:

20 катушек $\Gamma \times 3{,}5$ витка = 70 витков
10 катушек $Д \times 4$ витка = 40 витков
Всего 110 витков

Отпайки для регулирования сопротивления реактора:

$$\text{после } 110\sqrt{0{,}7} = 92\text{-го витка}$$

и

$$\text{после } 110\sqrt{0{,}5} = 78\text{-го витка.}$$

Расположение катушек на стержне:

9 катушек *Д*, 20 катушек *Г*, одна катушка *Д*.

Радиальный размер обмотки

$$a_1 = w_к a' = 4 \cdot 2 \cdot 0{,}43 = 3{,}45 \text{ см.}$$

Осевой размер обмотки

$$l = b' П_к + k(n_к - 1) h_к = 0{,}69 \cdot 30 + 0{,}96 \cdot 29 \cdot 0{,}4 = 32 \text{ см.}$$

Расстояние от обмотки до ярма

$$l_{01} = \frac{l_с - l}{2} = \frac{39{,}5 - 32}{2} = 3{,}75 \text{ см.}$$

Диаметры обмотки: внутренний

$$D_{вн} = d + 2a_{01} = 21 + 2 \cdot 1{,}5 = 24 \text{ см;}$$

наружный

$$D_{нар} = D_{вн} + 2a_1 = 24 + 2 \cdot 3{,}45 = 30{,}9 \text{ см.}$$

Расстояние между осями стержней

$$C = D_{нар} + a_{11} = 30{,}9 + 1{,}0 \approx 32 \text{ см.}$$

Проверяем величины $B_с$ и $U$ по фактически рассчитанным размерам:

$$B_с = \frac{178 I w П_х}{П_с n l_х} = \frac{1{,}78 \cdot 173{,}5 \cdot 110 \cdot 338{,}6}{274 \cdot 6 \cdot 0{,}75} = 9\,340 \text{ гс;}$$

$$П_х = 301{,}1 + 2 \cdot 0{,}485\,(37{,}6 + 2 \cdot 0{,}485) = 338{,}6 \text{ см}^3;$$

для $H = 5{,}0$ *см* и $l_х = 0{,}75$ *см* $\varepsilon = 0{,}485$ *см.*

Падение напряжения на обмотке при номинальном токе

$$U_с = 4{,}44 f w B_с П_с \cdot 10^{-8} = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 110 \cdot 9\,340 \cdot 274 \cdot 10^{-8} = 625 \text{ в.}$$

Полное падение напряжения

$$U = \frac{U_с}{1 - \frac{u_р}{100}} = \frac{625}{1 - \frac{10}{100}} = 695 \text{ в,}$$

что отличается от заданной величины 694 *в* менее чем на 1%.

Реактивное падение напряжения на реакторе, выраженное в процентах напряжения сети,

$$u_р = \frac{U\sqrt{3}\cdot 100}{U_1} = \frac{695\sqrt{3}\cdot 100}{6\,000} = 20{,}0\%.$$

Вес меди обмотки

$$G_м = 28cD_{ср}w\Pi\cdot 10^{-5} = 28\cdot 3\cdot 27{,}45\cdot 110\cdot 47{,}6\cdot 10^{-5} = 121{,}0 \ кг.$$

Потери короткого замыкания

$$P_э = 2{,}4\Delta^2 G_м = 2{,}4\cdot 3{,}65^2\cdot 121{,}0 = 3\,850 \ вт.$$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки [см. формулу (4-38)]

$$q_1 = 1{,}07\frac{3{,}65\cdot 173{,}5\cdot 4}{(3{,}45+0{,}69)\,0{,}75} = 870 \ вт/м^2.$$

Расчет потерь холостого хода

Размеры сердечника—по рис. 9-8. Активное сечение ярма принимаем равным сечению стержня:

$$\Pi_я = \Pi_с = 274 \ см^2.$$

Ширина ярма

$$b_я = 17 \ см;$$

Высота ярма

$$h_я = \frac{\Pi_{фя}}{b_я} = \frac{\Pi_{фс}}{17} = \frac{301{,}1}{17} = 17{,}7 \ см.$$

Общая высота сердечника

$$H_с = l_с + 2h_я = 39{,}5 + 2\cdot 17{,}7 = 74{,}9 \ см.$$

Поскольку расстояние от ярма трансформатора до крышки составляет 140 *см*, реактор может быть установлен вертикально над ярмом трансформатора.

Вес стали

$$G_{ст} = 3\,[(l_с - nl_x) + 2h_я + 4C]\,\Pi_с\gamma_{ст}\cdot 10^{-3} = 3\,[(39{,}5 - 4{,}5) + 2\cdot 17{,}7 + 4\cdot 32]\,274\cdot 7{,}6\cdot 10^{-3} = 268{,}4\cdot 274\cdot 7{,}6\cdot 10^{-3} = 560 \ кг.$$

Потери холостого хода

$$P_x = p_x G_{ст} = 0{,}71\cdot 560 = 400 \ вт;$$

для

$$B_с = 9\,340 \quad p_x = 0{,}89\cdot 0{,}8 = 0{,}71 \ вт/кг.$$

## 9-8. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ АГРЕГАТА

Перепад температур в обмотках. Обмотка ВН: внутренний перепад

$$\Theta_{10} = \frac{q\delta}{\lambda_{из}} 10^{-4} = \frac{870 \cdot 0{,}025}{0{,}0017} 10^{-4} \approx 1{,}3^\circ\ C;$$

перепад на поверхности

$$\Theta_{10м} = k_1 k_2 0{,}35 q^{0{,}6} = 1{,}0 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}35 \cdot 870^{0{,}6} = 20{,}3^\circ\ C;$$

$$\frac{h_к}{l_р} = \frac{0{,}75}{7{,}65} = 0{,}098;\ k_2 \approx 1{,}0.$$

Полный перепад

$$\Theta_{10м} = 1{,}3 + 20{,}3 = 21{,}6^\circ\ C.$$

Обмотка НН: внутренний перепад

$$\Theta_{20} = \frac{940 \cdot 0{,}025}{0{,}0017} 10^{-4} \approx 1{,}4^\circ\ C;$$

перепад на поверхности

$$\Theta_{20м} = 1{,}0 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}35 \cdot 940^{0{,}6} = 21{,}3^\circ\ C.$$

Полный перепад

$$\Theta_{20м} = 1{,}4 + 21{,}3 = 22{,}7^\circ\ C.$$

Тепловой расчет бака

Минимальные размеры бака по условиям изоляции.

Длина $A = 2C + D_1'' + 2s_1 = 2 \cdot 52{,}4 + 49{,}1 + 2 \cdot 2{,}2 = 158{,}3$ *см*;

ширина $B = D_1'' + s_1 + s_2 + d_1 + s_3 + 2b = 49{,}1 + 2{,}2 + 2{,}2 + 1{,}5 + 2{,}2 + 2 \cdot 8{,}0 = 73{,}2$ *см*,

где минимальные изоляционные расстояния взяты по табл. 3-5. Эти расстояния следующие: обмотка ВН—стенка бака $s_1 = 2{,}2$ *см;* отвод ВН—стенка бака $s_1 = 2{,}2$ *см;* отвод ВН—обмотка ВН $s_2 = 2{,}2$ *см*; по строке 2 табл. 3-5; отвод НН—балка ярма $s_3 = 2{,}0$ по строке 1 табл. 3-5; отвод НН—стенка бака—не менее ширины шины $b = 8{,}0$ *см* для уменьшения потока рассеяния отводов и потерь в стенках бака (рис. 9-9).

Минимальная глубина бака

$$H = H_в + H_{як} = 82{,}2 + 2 \cdot 22{,}1 + 5{,}0 + 27 = 158{,}4\ см.$$

Найденным минимальным размерам удовлетворяет бак трансформатора ЭТМ-1500/10 (см. табл. 7-6). Поскольку этот бак рассчитан на теплоотдачу трансформатора мощностью 1 500 *ква*, имеющего меньшие потери, увеличиваем поверхность за счет введения четвертого ряда труб и устанавливаем следующие основные размеры: длина $A = 183$ *см*; ширина $B = 86$ *см*; глубина $H = 277{,}5$ *см*.

На баке 4 ряда труб; шаг $t = 7{,}5$ *см*; размеры труб:

1-й ряд $b_1 = 195$ *см*; $a_1 = 5$ *см* $n_1 = 62$;

2-й ряд $b_2 = 210$ *см*; $a_2 = 12{,}5$ *см*; $n_2 = 62$;

3-й ряд $b_3 = 225$ *см*; $a_3 = 20{,}0$ *см*; $n_3 = 62$;

4-й ряд $b_4 = 240$ *см*; $a_4 = 27{,}5$ *см*; $n_4 = 62$.

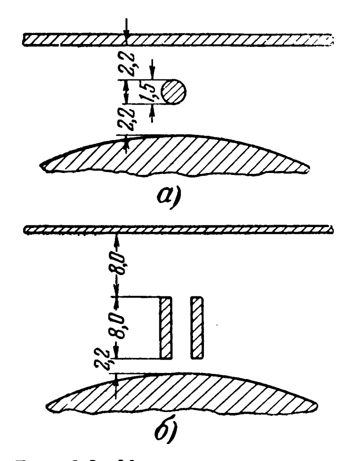



Рис. 9-9. Минимальные расстояния отводов от стенки бака и обмотки ВН.
*а* — отвод ВН; *б* — отвод НН.

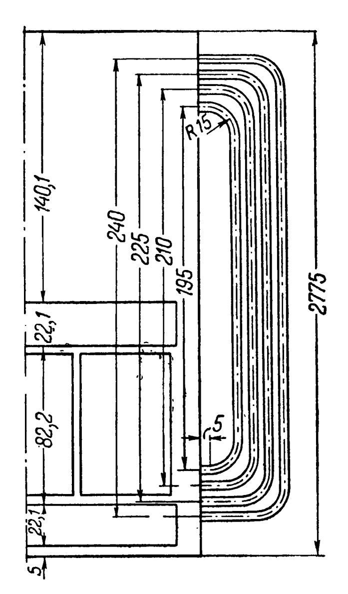



Рис. 9-10. Основные размеры бака.

Диаметр трубы $d = 5{,}1/4{,}74$ *см*; радиус изгиба $R = 15$ *см* (рис. 9-10
Поверхность гладкой части бака

$$П_{гл} = [2(A - B) + \pi B]\, H \cdot 10^{4} = [2(183 - 86) + 3{,}14 \cdot 86]\, 277{,}5 \cdot 10^{-4} = 12{,}9 \text{ м}^2.$$

Поверхность крышки

$$П_{кр} = \left[B_{кр}(A - B) + \frac{\pi B_{кр}^2}{4}\right] \cdot 10^{-4} = [100(197 - 100) + 0{,}785 \cdot 100^2] \cdot 10^{-4} \approx 1{,}8 \text{ м}^2$$

(согласно табл. 7-6 $A_{кр} = A + 14 = 183 + 14 = 197$ *см*;

$$B_{кр} = B + 14 = 86 + 14 = 100 \text{ см}).$$

Развернутая длина труб:

1-й ряд $l_1 = b_1 + 1{,}14\,R + 2\,a_1 = 195 + 1{,}14 \cdot 15 + 2 \cdot 5 = 222{,}0$ *см*;

2-й ряд $l_2 = l_1 + 4t = 222 + 4 \cdot 7{,}5 = 252$ *см*;

3-й ряд $l_3 = l_2 + 4t = 252 + 4 \cdot 7{,}5 = 282$ *см*;

4-й ряд $l_4 = l_3 + 4t = 282 + 4 \cdot 7{,}5 = 312$ *см*.

Поверхность излучения бака

$$П_и = [2\,(A - B) + \pi\,(B + 2a_1 + 2R + 2t\,(n-1) + d)]\,H \cdot 10^{-4} =$$

$$= 2\,(183 - 86) + 3{,}14(86 + 2 \cdot 5{,}0 + 2 \cdot 15 + 2 \cdot 7{,}5\,(4-1) + 5{,}1)\,277{,}5 \cdot 10^{-4} =$$

$$= 20{,}7\ м^2.$$

С учетом крышки

$$П_и = 20{,}7 + 0{,}9 = 21{,}6\ м^2.$$

Поверхность конвекции труб

$$П_{к.тр} = \pi d\,(m_1 l_1 + m_2 l_2 + m_3 l_3 + m_4 l_4) \cdot 10^{-4} =$$

$$= 3{,}14 \cdot 5{,}1\,(62 \cdot 222 + 62 \cdot 252 + 62 \cdot 282 + 62 \cdot 312) \cdot 10^{-4} = 106\ м^2.$$

Поверхность конвекции бака

$$П_к = П_{к.гл} k_{гл} + П_{кр} k_{кр} + П_{к.тр}\, k_{тр} =$$

$$= 12{,}9 \cdot 1{,}0 + 1{,}8 \cdot 0{,}5 + 106{,}0 \cdot 1{,}26 = 147{,}4$$

(коэффициенты $k$ — по табл. 7-5).

Потери, отводимые с поверхности бака [см. формулу (7-28)],

$$\Sigma P = 1{,}05 \left[ \frac{(P_{х\Delta} + P_{х.р} + P_{кр})\,T_\Delta + P_{х\lambda}\,T_\lambda}{T_\Delta + T'_\lambda} + P_к \right] =$$

$$= 1{,}05 \left[ \frac{(5\,750 + 400 + 3\,850)\,1{,}5 + 1\,835 \cdot 1{,}0}{1{,}5 + 1{,}0} + 24\,430 \right] = 32\,600\ вт.$$

Среднее превышение температуры стенки бака

$$\Theta_{б.в} = \left( \frac{\Sigma P}{2{,}8 П_и + 2{,}5\, П_к} \right)^{0{,}8} = \left( \frac{32\,600}{2{,}8 \cdot 21{,}6 + 2{,}5 \cdot 147{,}4} \right)^{0{,}8} = 32{,}1^\circ\ C;$$

$$\Theta_{м.б} = 0{,}165 \left( \frac{\Sigma P}{\Sigma П_к} \right)^{0{,}6} = 0{,}165 \left( \frac{32\,600}{12{,}9 + 0{,}9 + 106} \right)^{0{,}6} = 4{,}8^\circ\ C.$$

Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой окружающего воздуха

$$\Theta_{м.в.в} = \sigma\,(\Theta_{о.м} + \Theta_{м.б}) = 1{,}2\,(32{,}1 + 4{,}8) = 44{,}3^\circ\ C < 50^\circ\ C.$$

Превышение температуры обмоток над температурой окружающего воздуха

$$\Theta_{о.в} = \Theta_{о.м} + \Theta_{б.в} + \Theta_{м.б}.$$

Обмотка ВН $\Theta_{1о.в} = 21{,}6 + 32{,}1 + 4{,}8 = 58{,}5^\circ\ C < 60^\circ\ C$.

Обмотка НН $\Theta_{2о.в} = 22{,}7 + 32{,}1 + 4{,}8 = 59{,}6^\circ\ C < 60^\circ\ C$.

## 9-9. СВОДНЫЕ ДАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО АГРЕГАТА

### Данные трансформатора ЭТМ-1800/6

**Основные данные**

Мощность $S = 1\,800$ *ква*; число фаз $m = 3$; $f = 50$ *гц*.

Номинальные напряжения:

$$\text{ВН} - U_1 = 6\,000 \text{ в}; \ \text{НН} - U_2 = 246 - 210 - 142 - 121 \text{ в}.$$

Номинальные токи:

$$\text{ВН} - I_1 = 173{,}5 \text{ а}; \ \text{НН} - I_2 = 4\,220 \text{ а}.$$

Схемы и группа $\Delta - \lambda/\Delta - 12\text{-}11$.

Охлаждение естественное масляное, длительная нагрузка ($T_\Delta = 1{,}5$ *ч*; $T_\lambda = 1$ *ч*), установка внутренняя.

**Сердечник.** Сталь марки Э330 0,35 *мм*, междулистовая изоляция— лак.

Индукция $B_с = B_я = 16\,520$ *гс*; напряжение витка $u_в = 20{,}5$ *в*.

Размеры сердечника: $d = 29{,}2$ *см*; $l_с = 82{,}2$ *см*; $C = 53{,}0$ *см*.

$$П_с = П_я = 558{,}6 \text{ см}^2.$$

Вес стали $G_с = 1\,050$ *кг*; $G_я = 1\,086$ *кг*; $G_{ст} = 2\,136$ *кг*.

**Характеристики холостого хода**

Потери: $P_{х\Delta} = 5\,750$ *вт*; $P_{х\lambda} = 1\,835$ *вт*.

Токи: $i_0 = 3{,}78\%$; $i_{0a} = 3{,}77\%$; $i_{0c} = 0{,}32\%$.

**Обмотки** — чередующиеся из двух магнитно-уравновешенных групп (4 подгруппы).

**Обмотка ВН** — спиральная катушечная.

$$U_{1ф} = 6\,000 \text{ в}; \ I_{1ф} = 100 \text{ а}.$$

Число витков: $w_1 = 292$ витка; $w_1 + w_{рег} = 342$ витка.

Изоляция обмотки:

| а) от стержня | б) от обмотки НН | в) от ярма |
|---|---|---|
| $a_{ц1} = 1{,}4$ *см*; | $a_{12} = 1{,}6$ *см*; | $l_o = 3{,}6$ *см*; |
| $\delta_ц = 0{,}5$ *см*; | $\delta_{12} = 0{,}3$ *см*; | $\delta_ш = 0{,}3$ *см*; |
| $a_{01} = 2{,}3$ *см*; | | $l_{оц} = 2{,}0$ *см*. |

Провод марки ПББО

$$2 \times \frac{2{,}44 \times 5{,}9}{2{,}94 \times 6{,}4}.$$

Сечение витка $П_1 = 2 \times 13{,}9 = 27{,}8$ *мм*$^2$.

Плотность тока $\Delta_1 = 3{,}6$ *а/мм*$^2$.

Диаметры: внутренний $D_1' = 33{,}8$ *см*; наружный $D_1'' = 49{,}1$ *см*.

Каналы между катушками $h_к = 0{,}75$ *см*.

Высота подгруппы $l_1 = 7{,}4$ *см*; $q_1 = 870$ *вт/м*$^2$.

**Обмотка НН** — винтовая.

$$U_{2ф} = 246 \text{ в}; \ I_{2ф} = 2\,440 \text{ а}.$$

Число витков $w_2 = 12$; число параллельных ветвей — 2 (конструктивно объединены обмотки двух подгрупп).

Провод марки ПББО

$$16 \times \frac{3{,}8 \times 5{,}5}{4{,}3 \times 6{,}0}.$$

Сечение витка $П_2 = 16 \cdot 20{,}4 = 326{,}4$ *мм²* (одна ветвь).
Плотность тока $\Delta_2 = 3{,}74$ *а/мм²*.
Диаметры: внутренний $D_2' = 33{,}8$ *см*; наружный $D_2'' = 47{,}6$ *см*.
Каналы между витками $h_к = 0{,}75$ *см*.
Высота подгруппы $l_2 = 7{,}85$ *см*; $q_2 = 940$ *вт/м²*.

**Вес меди трансформатора:**

Обмотка ВН — 331,3 *кг*
Отводы ВН — 2,2 *кг*
Обмотка НН — 268,5 *кг*
Отводы НН — 45,0 *кг*

Общий вес меди $G_м = 647$ *кг*

**Характеристики короткого замыкания**

Потери

$$P_{1э}k_{1д} = 9\,460 \text{ вт}$$
$$P_{2э}k_{2д} = 9\,660 \text{ вт}$$
$$P_{1от} = 70 \text{ вт}$$
$$P_{2от} = 2\,040 \text{ вт}$$
$$P_б = 3\,200 \text{ вт}$$

$$P_к = 24\,430 \text{ вт}$$

Напряжение $u_к = 8{,}7\%$; $u_а = 1{,}36\%$.

Реактивная составляющая: обмотки $u_{р.обм} = 8{,}45\%$
отводы НН $u_{р.от} = 0{,}15\%$

$u_р = 8{,}6\%$

Механические напряжения в обмотках:
сжатия на прокладках

$$\sigma_{сж} = 5 \text{ кг/см}^2;$$

на изгиб в проводе

$$\sigma_и = 208 \text{ кг/см}^2.$$

**Температуры обмоток и масла**

Обмотка ВН $\Theta_{1о.в} = 58{,}5°$ С.
Обмотка НН $\Theta_{2о.в} = 59{,}6°$ С.
Масло в верхних слоях $\Theta_{м.в.в} = 44{,}3°$ С.

**Реактор**

Мощность 360 *ква*; число фаз — 3.
Номинальное напряжение $U = 690$ *в*; номинальный ток $I = 173{,}5$ *а*.
**Сердечник:** $d = 21{,}0$ *см*; $l_с = 39{,}5$ *см*; $C = 32$ *см*; $П_с = П_я = 274$ *см²*; $B_с = 9\,340$ *гс*; вес стали $G_{ст} = 560$ *кг*.
В стержне 6 зазоров $\times$ 0,75 *см* = 4,5 *см*.
Потери холостого хода $P_х = 400$ *вт*.
**Обмотка** — спиральная катушечная; 110 витков с отпайками после 78 и 92-го витков; $\Delta = 3{,}65$ *а/мм²*; вес меди $G_м = 121$ *кг*.
Потери короткого замыкания $P_к = 3\,850$ *вт*.
Падение напряжения $u_{кр} = 20{,}0\%$.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Бабат Г. И., Дершварц Г. В., Свенчанский А. Д. и Смелянский М. Я., Электрические промышленные печи. Под общ. ред. А. Д. Свенчанского, гл. 1 и 14, Госэнергоиздат, 1948.
2. Маринченко В. А., Электрооборудование дуговых печей трехфазного тока, Металлургиздат, 1955.
3. Тихомиров П. М., Расчет трансформаторов, Госэнергоиздат, 1953.
4. Сапожников А. В., Конструирование трансформаторов, Госэнергоиздат, 1959.
5. Справочник по электрической изоляции, под ред. Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева, разд. XXI, Госэнергоиздат, 1948.
6. Петров Г. Н., Трансформаторы, § 68, 75, 83, Госэнергоиздат, 1934.
7. Калантаров П. А. и Цейтлин Л. А., Расчет индуктивностей, гл. 3, Госэнергоиздат, 1955.
8. Электротехнический справочник, под ред. М. Г. Чиликина, т. 1, разд. 9, Госэнергоиздат, 1955.
9. Булгаков Н. И., Расчет трансформаторов, § 5-5, Госэнергоиздат, 1950.